

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA TÉRMICA Y FLUIDOS

TRABAJO FIN DE GRADO

**DISEÑO DE UN REACTOR DE LECHO FLUIDIZADO
PARA LA TRANSFORMACIÓN TERMOQUÍMICA DE
BIOMASA U OTROS COMBUSTIBLES**

AUTOR: DANIEL MARRUPE ACEITUNO

TUTOR: SERGIO SÁNCHEZ DELGADO

Agradecimientos

A Sergio, por su inestimable ayuda durante todo el desarrollo del proyecto. Gracias por tu dedicación, interés y apoyo.

A mis padres, por su continuo esfuerzo para que sus hijos tengan la oportunidad de labrarse un futuro mejor.

A mis hermanos, por estar siempre ahí.

A todos los compañeros y amigos que me han acompañado durante la carrera. En especial a Antonio, Carlos, Manzano, Mario, Orteso, Yago, Ramiro, Manzaneque, Laura y a Los Descartes de Floren.

A mis amigos de La Holanda.

A los Siempre Fuertes.

A Paula, por aguantarme.

Gracias a todos.

ÍNDICE

NOMENCLATURA	7
RESUMEN	9
ABSTRACT	11
1. INTRODUCCIÓN	13
1.1 Motivación	14
1.2 Objetivos	16
1.2.1 Objetivos académicos	16
1.2.2 Objetivos técnicos	16
2. CONCEPTOS DE FLUIDIZACIÓN	17
2.1 Conceptos generales de la fluidización	18
2.1.1 El fenómeno de la fluidización	18
2.1.2 Comportamiento fluido de un lecho fluidizado	21
2.1.3 Calidad de la fluidización	22
2.1.4 Clasificación de las partículas	23
2.1.5. Ventajas e inconvenientes de los lechos fluidizados	24
2.1.6 Aplicaciones de los lechos fluidizados	25
<i>Operaciones físicas</i>	25
<i>Reacciones de síntesis</i>	27
<i>Craqueo de hidrocarburos</i>	27
<i>Combustión</i>	27
<i>Gasificación</i>	28
<i>Activación del carbón</i>	29
<i>Calcinación</i>	29
2.2 Conceptos específicos: Tipos de distribuidores	30
2.2.1 Distribuidores ideales	30

2.2.2 Distribuidores de placas perforadas o de orificios múltiples	30
2.2.3 Toberas y “gorras”	31
2.2.4 Redes de tuberías y rociadores	32
3. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL	33
3.1 Descripción del reactor	34
3.2 Descripción de las partículas	34
3.3 Descripción del distribuidor	35
3.4 Sistema de alimentación de aire	37
3.5 Sistema de adquisición de datos	38
3.6 Esquema general de la instalación	40
4. VELOCIDAD DE MÍNIMA FLUIDIZACIÓN	41
4.1 Descripción de la toma de medidas	42
4.2 Cálculo de la pérdida de carga del distribuidor	43
4.3 Cálculo de la velocidad de mínima fluidización: Método teórico	43
4.4 Cálculo de la velocidad de mínima fluidización: Método experimental de la pérdida de carga en el lecho	45
4.5 Resultados	48
4.6 Conclusiones	51
5. PATRONES DE FLUJO DE LAS BURBUJAS EN EL LECHO	53
5.1 Introducción	54
5.2 Objetivo	57
5.3 Descripción de la toma de medidas	57
5.4 Procesado e interpretación de las imágenes	58
5.5 Procesado e interpretación de los niveles de gris a distintas alturas de lecho	60
5.6 Velocidad de mínima fluidización: Consideraciones de ensayo	62

5.7 Resultados	64
6. FRECUENCIA CARACTERÍSTICA DEL LECHO FLUIDIZADO	77
6.1 Introducción. Procesado	78
6.2 Descripción de la toma de medidas	80
6.3 Resultados	80
7. CONCLUSIONES FINALES. TRABAJOS FUTUROS	85
7.1 Conclusiones académicas	86
7.2 Conclusiones técnicas	86
7.3 Trabajos futuros	87
BIBLIOGRAFÍA	88
ANEXOS	89
Anexo I: Presupuesto	90
Anexo II: Códigos de Matlab	91
Anexo III: Obtención de la zona de tránsito entre el modelo de ascenso de dos columnas y el modelo de una columna central. Gráficas de niveles de gris a distintas alturas.	95

NOMENCLATURA

A_{ab}	Área abierta al paso de aire
Ar	Número de Arquímedes
A_t	Área total del distribuidor
d_p	Diámetro de partícula
d_t	Diámetro de un agujero del distribuidor
e	Espesor del lecho
e_e	Espesor del distribuidor
\mathcal{E}	Fracción de vacío en lecho fijo
\mathcal{E}_{mf}	Fracción de vacío a mínima fluidización
\mathcal{E}_e	Fracción de vacío de la emulsión
F_b	Frecuencia natural de oscilación de un lecho fluidizado
F_e	Frecuencia de erupción de las burbujas en la superficie del lecho
F_g	Frecuencia de generación de burbujas
f_s	Frecuencia de muestreo
FFT	Transformada rápida de Fourier
g	Gravedad
H_T	Altura total de la columna del reactor
L	Altura del lecho
N_a	Número de agujeros abiertos al paso de aire
N_T	Número de agujeros totales
m_b	Masa aparente del lecho
μ_g	Viscosidad del aire
PSD	Densidad de la potencia espectral
Pplenum	Presión media en el plenum

ΔP_{LECHO}	Pérdida de carga en el lecho
ΔP_d	Pérdida de carga en el distribuidor
Re	Número de Reynolds
ρ_p	Densidad de la partícula
ρ_b	Densidad aparente del lecho
ρ_g	Densidad del aire
Φ_s	Esfericidad de la partícula
U_o	Velocidad superficial del gas
U_{mf}	Velocidad de mínima fluidización
U_{mb}	Velocidad de mínimo burbujeo
V_b	Volumen aparente del lecho
W	Ancho del lecho
W_d	Ancho del distribuidor

RESUMEN

Actualmente, se presentan retos tecnológicos para la aplicación de los lechos fluidizados en sistemas de gestión de residuos sólidos urbanos y de biomasa enfocados en la valorización energética para su uso como combustible. Este enfoque presente y futuro de los lechos fluidizados se encuentra dentro de un marco de investigación europeo denominado *Horizon 2020*. Este trabajo, perteneciente al estudio de los patrones generales de flujo de las burbujas en los lechos fluidizados, tratará de ayudar en la investigación de estos sistemas sólido-gas.

El objetivo principal del proyecto es conocer la influencia en los patrones de flujo de las burbujas de distintas configuraciones de disposición de agujeros, homogéneamente distribuidos, de un distribuidor de orificios múltiples con una pérdida de carga igual para todas las configuraciones, que actúan bajo las mismas condiciones de operación: relación de aspecto y exceso de aire.

Aunque de manera más general, se tratará de conocer la influencia de las distintas configuraciones de disposición de agujeros en la frecuencia característica del lecho.

El estudio se realiza en un reactor bidimensional en el que se hacen fluidizar microesferas de vidrio mediante aire. El sistema de aire cuenta con un caudalímetro y un humidificador. Se realiza una adquisición de señales de presión a través de dos sensores de presión colocados en el plenum y en la columna del reactor. Además, se realiza una adquisición de imágenes del lecho a través de una cámara de alta velocidad.

En lo referente a los patrones de flujo de las burbujas, se analizan y se comparan las distintas configuraciones de agujeros para tres relaciones de aspecto distintas y cuatro excesos de aire a través de las imágenes adquiridas por la cámara. Las imágenes se procesan con MATLAB para la obtención final de una imagen promedio en escala de grises para cada una de las condiciones de operación a analizar. Además, se comparan las alturas a las que se produce el tránsito entre el modelo de ascenso de dos columnas y el modelo de ascenso de una columna central. También, se realiza un análisis comparativo de la altura media de lecho fijo de cada uno de los casos analizados. Se compara la altura media del lecho fijo para las distintas configuraciones graficando los valores en escala de grises correspondientes a la línea horizontal de la altura media del lecho fijo de las imágenes promedio anteriormente obtenidas.

Se concluye que bajo las mismas condiciones de operación, los patrones de flujo de las burbujas de las distintas configuraciones de agujeros presentan las mismas características generales asemejándose al modelo de ascenso de una columna central. La diferencia principal radica en la altura a la que se produce el tránsito al modelo de una columna: La altura a la que se produce el tránsito es menor cuanto mayor es el

número de agujeros juntos en cada terna de agujeros. Es decir, más predominante es el modelo de ascenso de una columna central.

En lo referente al cálculo de la frecuencia característica, las señales de presión han sido tratadas en MATLAB y se ha realizado un análisis de la densidad de la potencia espectral (PSD) con el objetivo de obtener un valor aproximado de la frecuencia característica del lecho. Se comparan las distintas configuraciones bajo condiciones de operación iguales. Se han utilizado tres relaciones de aspecto distintas y un exceso de aire.

Podemos concluir, a través de este análisis general PSD, que no existen diferencias significativas entre las frecuencias características de las distintas configuraciones analizadas bajo las mismas condiciones de operación.

ABSTRACT

Nowadays, technological challenges are presented for the application of fluidized beds in systems management of municipal solid waste and biomass focused on energy recovery for use as fuel. This approach about the present and future of fluidized beds is within a European research framework called Horizon 2020. This work belongs to the study of the general bubbles patterns in the fluidized beds, and it will try to assist in the investigation of these systems solid-gas.

The main focus of the project is to understand the influence on the bubbles patterns of different layout configurations of orifices, evenly distributed, which belongs to a distributor of multi-orifices with an equal pressure drop for all configurations, operating under the same fluidization conditions: aspect ratio and excess air.

Even more generally, it will try to determine the influence of different layout configurations of orifices in the characteristic frequency of the bed.

The experimental study is conducted in a two-dimensional reactor wherein glass microspheres are fluidized by air. The air system has a flowmeter and humidifier. Acquisition of pressure signals was performed using two pressure sensors placed in the plenum and the reactor column. In addition, the imaging of the fluidized bed is made with a high-speed camera.

Bubbles patterns are analyzed for the different configurations using three different aspect ratios and four excess air. Bubbles patterns are compared through the images acquired by the camera by processing them with MATLAB to finally obtain an average grayscale image for each of the fluidized conditions analyzed. In addition, the heights to which the transition for two columns model to one column model produces are compared. A comparison of the lines of the images corresponding to the average height of the fixed bed is also performed in grayscale.

We conclude that under the same fluidization conditions the bubble patterns of different layout configurations of orifices have the same general characteristics, resembling the one column model. The main difference is the height at which the transition to the one column model occurs: The height at which the transition occurs is lower the greater the number of orifices together in each triplet of orifices. The one column model is more predominant.

Regarding the calculation of the characteristic frequency, pressure signals have been treated in MATLAB and it has performed an analysis of the power spectral density (PSD) in order to obtain an approximate value of the characteristic frequency of the bed. Several configurations are compared under the same fluidization conditions: Three different aspect ratio and one excess air are used.

We conclude, through this general PSD analysis, that there are no significant differences between the characteristic frequencies of the different configurations analyzed under the same fluidization conditions.

1. INTRODUCCIÓN:

1.1 MOTIVACIÓN

La fluidización ha estado presente en la industria desde 1942 cuando era usada en el craqueo catalítico de hidrocarburos. A pesar de que cada vez ha ido cogiendo más peso en la industria y ha suscitado mayor interés entre los investigadores, la ingeniería de la fluidización aún no se ha convertido en una disciplina capaz de presentar una teoría uniforme y sólida que desarrolle todos los conceptos que engloba. La mayoría de análisis y estudios han surgido al calor de la experimentación, resolviendo las principales dudas de la disciplina pero sin poder extrapolar los resultados a un campo de aplicación mayor. A día de hoy, aún es necesaria la ampliación de conocimientos tanto teóricos como experimentales para seguir abriendo paso a una disciplina con un inmenso potencial industrial.

Un concepto necesario de conocer para entender el interés presente y futuro de la fluidización es la “valorización” energética. “La *valorización* es cualquier operación cuyo resultado principal sea que el residuo sirva a una finalidad útil al sustituir a otros materiales que de otro modo se habrían utilizado para cumplir una función particular, o que el residuo sea preparado para cumplir esa función, en la instalación o en la economía en general. Para la valorización energética, la utilización principal de los residuos será como combustible u otro modo de producir energía.”[1] Este nuevo tratamiento que se da a los residuos urbanos y por ende a la biomasa está contemplado en la *Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo sobre los residuos, de 19 de noviembre de 2008*.

La fluidización está presente en el tratamiento de residuos urbanos y de la biomasa principalmente a través de dos procedimientos: La incineración (mediante un horno de lecho fluido) y la gasificación de residuos sólidos (donde los reactores de gasificación son lechos fluidizados).

Si enfocamos la valorización energética desde un punto de vista dentro de las energías renovables, debemos hablar del ciclo cerrado del CO₂. Al utilizar como combustible biomasa (astillas de madera, huesos de aceituna etc.) el CO₂ que se emitirá o por su incineración o a través de la quema del gas síntesis que se forma en su gasificación, se contrarresta con el CO₂ que ha fijado en vida.

Estas aplicaciones de la fluidización, con un potencial presente y futuro bastante interesante, están recogidas en el programa de investigación e innovación de la Unión Europea *Horizon 2020*. Este programa creará un marco en la UE que ayudará al desarrollo de las nuevas disciplinas en pro de mejorar la ciencia e investigación en Europa.

En lo referente a la motivación académica, un Trabajo Fin de Grado que pertenezca al estudio de la fluidización presenta una motivación principalmente por la importante carga experimental que contiene. Es importante para el desarrollo académico, más centrado en los planteamientos teórico-prácticos de la ingeniería, el tener la oportunidad de enfrentarse a los problemas que el laboratorio y el ensayo en sí plantean en la toma de medidas, las cuales son necesarias que se realicen de la mejor forma posible para la posterior implementación y posterior análisis de los resultados. También es interesante el posterior tratamiento de los resultados, en este caso, de las imágenes y de las señales de presión por medio de una herramienta computacional tan polivalente como MATLAB. Así con todo, poder adquirir experiencia, conocimiento y habilidad en un campo en continuo desarrollo supone una motivación más que suficiente para desarrollar este Trabajo Fin de Grado.

En lo referente a la motivación técnica, es necesario destacar la importancia que tienen las burbujas en los lechos fluidizados. El movimiento de las burbujas es el mecanismo de transporte principal de las partículas a lo largo del lecho. La capacidad de mezclado de los lechos fluidizados, cualidad a destacar de este sistema por encima de otros tipos de contactos sólido gas, está relacionada con cómo las burbujas de gas se mueven dentro del lecho. Un estudio de los patrones de flujo de las burbujas, puede ayudar a entender mejor el comportamiento general de los lechos fluidizados. También, no es sólo conocer por dónde suben preferentemente las burbujas, además, es necesario conocer si existe una relación temporal entre los sucesos que están ocurriendo dentro del lecho. Esto se puede conseguir a través del cálculo de la frecuencia característica. Además, hay que añadir la importancia de los distribuidores en la fluidización. Un distribuidor que proporcione una distribución del gas homogénea ayudará a que la fluidización sea más homogénea y por tanto de mayor calidad. Con el estudio de los patrones de flujo de las burbujas para distintas configuraciones de un mismo distribuidor, se trata de analizar la influencia del distribuidor en el comportamiento general del lecho intentando aportar información que resulte de ayuda para la investigación de la fluidización.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVOS ACADÉMICOS

- Montaje y desmontaje de los componentes de un reactor bidimensional para conseguir las distintas configuraciones de agujeros requeridas usando un mismo distribuidor.
- Montaje de una instalación de aire para provocar la fluidización de un lecho de partículas dentro del reactor.
- Montaje de los componentes necesarios para la obtención de información del lecho fluidizado en lo referente a las señales de presión y la captación de imágenes.
- Procesado de las imágenes y de las señales de presión mediante la herramienta computacional MATLAB.
- Estudio, análisis comparativo y conclusiones de los objetivos técnicos que se plantean a través del uso de las imágenes, señales de presión procesadas y sus derivados.

1.2.2 OBJETIVOS TÉCNICOS

- Estudio de la influencia en los patrones de flujo de las burbujas de cuatro configuraciones distintas de colocación de agujeros abiertos, homogéneamente distribuidos, que presentan el mismo área abierta de paso de aire, pertenecientes a un mismo distribuidor de orificios múltiples con una pérdida de carga igual para todas las configuraciones, cuando éstas se enfrentan a las mismas condiciones de operación: Relación de aspecto (L/W) y exceso de aire (U/U_{mf}).
Se analizará esta influencia para cuatro configuraciones de colocación de agujeros distintas. Para las cuales, las condiciones de operación serán: Relaciones de aspecto del lecho, $L/W=1$, $L/W=1,333$, $L/W=1,667$; Y para cada una de las relaciones de aspecto se compararán, además, para los siguientes excesos de aire: $U/U_{mf}=1$, $U/U_{mf}=1,5$, $U/U_{mf}=2$, $U/U_{mf}=2,5$. Así, tendremos doce condiciones de operación en las que comparar las distintas configuraciones del distribuidor.
- Estudio de la influencia en la frecuencia característica de un lecho fluidizado de las cuatro configuraciones de agujero descritas bajo las mismas condiciones de operación. En este caso las condiciones de operación serán: Relaciones de aspecto, $L/W=1$, $L/W=1,333$, $L/W=1,667$ para un exceso de aire de $U/U_{mf}=2,5$.

2. CONCEPTOS DE FLUIDIZACIÓN:

2.1 CONCEPTOS GENERALES DE LA FLUIDIZACIÓN

Daizo Kunii y Octave Levenspiel [2] realizaron un importante estudio del estado del arte de la fluidización, de los principales conceptos que se engloban en la fluidización y de las distintas aplicaciones en las que trabajan los lechos fluidizados. Los principales conceptos se encuentran resumidos en este punto del trabajo.

2.1.1 El Fenómeno de la fluidización

La fluidización es el fenómeno por el cual un lecho de partículas sólidas se suspende en el seno de un gas o un líquido de tal manera que su comportamiento es semejante al de un fluido.

Si un fluido en movimiento ascendente y a baja velocidad se hace pasar a través de un lecho de partículas finas, el fluido se filtra a través de los espacios de las partículas, las cuales permanecen estacionarias. Este tipo de lecho se denomina **lecho fijo**. Si se incrementa la velocidad del fluido, las partículas comenzarán a moverse de manera independiente por medio de pequeñas vibraciones.

Si aún se aumenta más la velocidad del fluido, el lecho alcanza un punto en el que todas las partículas se encuentran en suspensión por la acción del flujo ascendente del gas o líquido. En este punto, la fuerza de fricción entre las partículas y el fluido se contrarresta con el peso de las partículas. La componente vertical de la fuerza de compresión entre las partículas adyacentes desaparece y la pérdida de carga a través de un volumen determinado de lecho es igual al peso de las partículas existentes en ese volumen por unidad de área. Este tipo de lecho se denomina **Lecho a mínima fluidización**, y marca la transición entre el lecho fijo y lecho plenamente fluidizado. La velocidad superficial del gas o líquido en este punto se denomina Velocidad de mínima fluidización, U_{mf} .

En un sistema fluidizado por líquido, un incremento de la velocidad por encima de la velocidad de mínima fluidización da lugar a una suave y progresiva expansión del lecho. Las posibles inestabilidades provocadas por un flujo irregular desaparecen y no se observan heterogeneidades ni formación de burbujas en el lecho. Este tipo de lecho se denomina **Lecho de fluidización particulada**. En sistemas fluidizados por gas, este tipo de fluidización sólo puede observarse con partículas muy ligeras y con gas denso a alta presión.

Los sistemas fluidizados por gas se comportan de manera diferente. Con un incremento de la velocidad por encima de la velocidad de mínima fluidización, se observan grandes inestabilidades con aparición de burbujas y canales de aire. A una mayor velocidad del gas, se produce una mayor agitación y el movimiento de los

sólidos comienza a ser más energético. Además, el lecho no se expande mucho más de lo expandido a mínima fluidización. Este tipo de lecho se denomina **Lecho burbujeante**.

En algunos casos, los sistemas fluidizados por líquido pueden comportarse como un lecho burbujeante, por ejemplo, lechos de partículas muy densas fluidizados por líquidos de baja densidad.

En los sistemas fluidizados por gas, a velocidades mayores de la velocidad de mínima fluidización, se produce la coalescencia de las burbujas y su crecimiento según van subiendo a través del lecho. En lechos largos y de pequeño diámetro, las burbujas llegan a ser tan grandes como para extenderse casi todo el diámetro del reactor. Este fenómeno se conoce como **Slugging**. Las burbujas cuyo diámetro es próximo al del reactor se denominan slugs. Cuando las partículas son pequeñas, éstas descienden suavemente entre las paredes del reactor y la burbuja. Este comportamiento se denomina **Slugging con slugs axiales**. Cuando las partículas tienen mucho grosor, la porción del lecho que se encuentra por encima de la burbuja es empujada hacia arriba como si lo hiciese un pistón. Las partículas en este caso descienden y la slug se desintegra. A partir de ese momento comienza a formarse otra slug, repitiéndose el mismo proceso. Este comportamiento se denomina **Slugging con slugs de pared**.

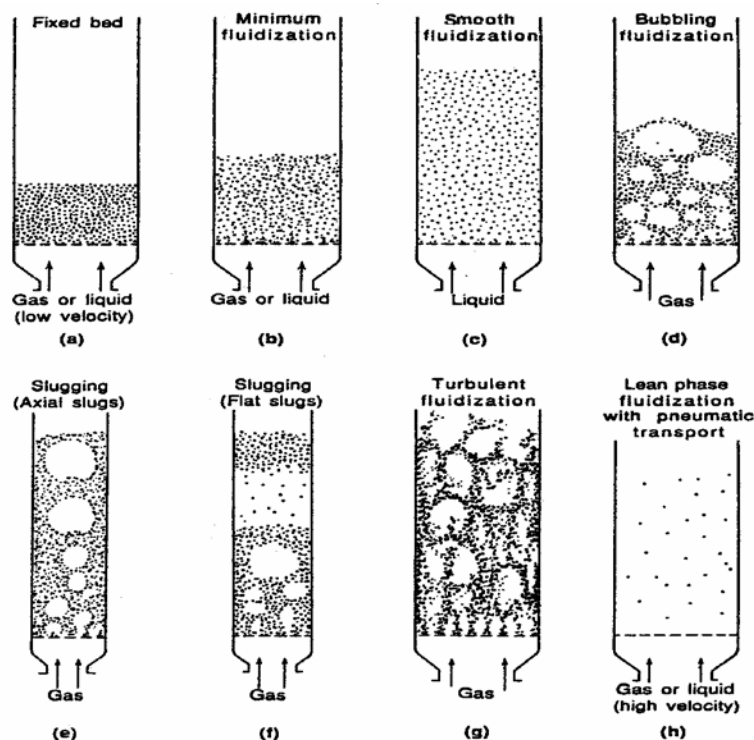


Imagen 2.1. Tipos de fluidización. [2] p.2.

En la fluidización de partículas finas a una velocidad del gas suficientemente alta, se supera el valor de la velocidad terminal de los sólidos. En este instante, se aprecia el arrastre de partículas con lo que desaparece la superficie superior del lecho y, en lugar de burbujas, se observa un movimiento turbulento de grupos de sólidos y espacios de gas de varios tamaños y formas. A este estado del lecho se le denomina **Lecho fluidizado turbulento**.

Con un aumento de la velocidad aún mayor, las partículas abandonan el lecho con el gas. En este caso se tiene un **lecho fluidizado de fase dispersa con transporte neumático de partículas**.

En la fluidización turbulenta y la fluidización de fase dispersa con transporte neumático, el gas puede arrastrar grandes cantidades de partículas, las cuales son necesarias hacer retornar al lecho. La recuperación de estas partículas se hace con la ayuda de ciclones, los cuales son elementos de sedimentación por fuerza centrífuga. Los sistemas que utilizan ciclones para recuperar las partículas se denominan lechos **fluidizados circulantes**.

En los lechos fluidizados turbulentos en los que se produce un arrastre moderado se utilizan ciclones internos. Este sistema se denomina **lecho fluido**.

En los lechos fluidizados de fase dispersa como el arrastre es mayor se utilizan ciclones de un tamaño mayor colocados fuera del lecho. Este tipo de sistema se denomina **lecho de fluidización rápida**.

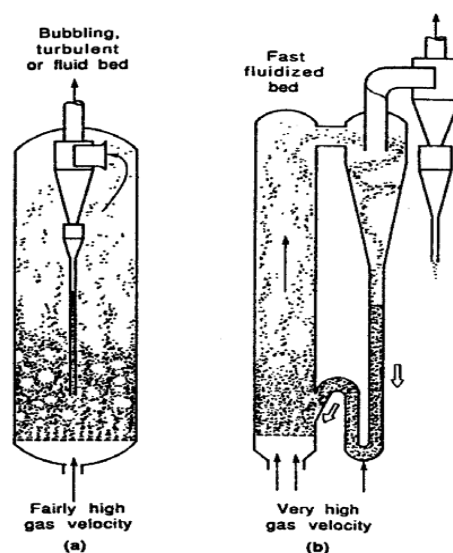


Imagen 2.2. Lechos fluidizados circulantes.

(a) Lecho fluido. (b) Lecho de fluidización rápida. [2] p.3.

Otro fenómeno que se puede dar en el contacto gas-sólido es el que se produce cuando un chorro de gas se abre paso a través del lecho. El chorro de gas a alta velocidad empuja el lecho hacia arriba transportando consigo una gran cantidad de partículas a la superficie superior. El resto de partículas caen lentamente alrededor del chorro o descienden mientras el gas se filtra en los alrededores del chorro. Este tipo de lecho se denomina **lecho de chorro**.

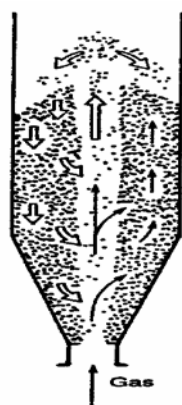


Imagen 2.3. Lecho de chorro. [2] p.4.

2.1.2 Comportamiento fluido de un lecho fluidizado

El comportamiento de un lecho de partículas fluidizado por gas es semejante al de un líquido en ebullición y, en muchos aspectos, muestra un comportamiento similar al de un fluido.

Por ejemplo, si se sumerge un objeto de gran tamaño y baja densidad en el lecho fluidizado, rápidamente aparecerá en la superficie al dejarlo libre.

Al igual que pasa con los líquidos, si inclinamos un lecho fluidizado la superficie superior del lecho permanecerá horizontal.

Si se hace un agujero en el reactor, las partículas saldrán a través de él en forma de chorro.

Si se conectan dos lechos fluidizados la altura de ambos se equilibrará y acabarán a la misma altura. Además, la diferencia de presión entre dos puntos del lecho es proporcional a la diferencia de altura entre ellos.

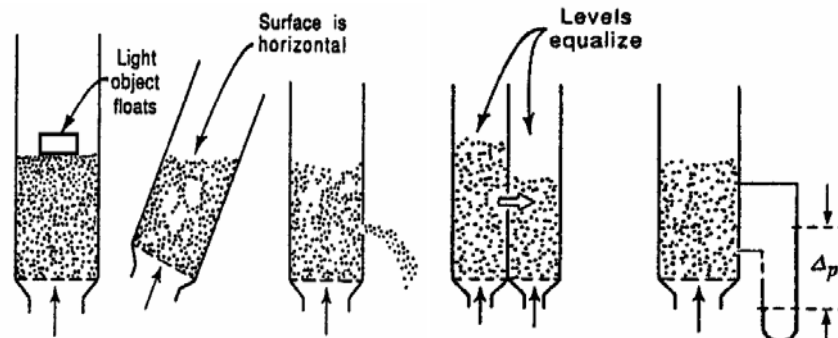


Imagen 2.4. Distintos tipos de comportamiento fluido de los lechos fluidizados. [2] p.5.

2.1.3 Calidad de la fluidización

El término fluidización hace referencia tanto a sistemas de fase densa como a sistemas de fase dispersa, pero es en los sistemas de fase densa donde se centran las distintas tareas de investigación. La capacidad para fluidizar de las partículas, y las condiciones de operación que lo permiten, varían mucho según el tipo de sistema y dependen de múltiples factores.

El primer factor a tener en cuenta es el tamaño de los sólidos y su distribución en el seno de lecho. Normalmente, las partículas pequeñas tienden a aglomerarse si están húmedas, con lo que el lecho se debe agitar para mantener las condiciones de fluidización. La agitación se puede llevar a cabo por medio de agitadores mecánicos o usando la propia energía cinética del gas cuando éste entra a altas velocidades.

Las partículas finas con una gran distribución de tamaños se pueden fluidizar en un amplio rango de velocidades de gas, permitiendo operaciones flexibles con lechos profundos y grandes.

Otro factor a tener en cuenta para realizar una fluidización de calidad es la relación de densidades entre el fluido y las partículas. Aunque los sistemas líquido-sólido suelen fluidizar de manera homogénea y los gas-sólido suelen hacerlo de manera más heterogénea, es posible observar comportamientos atípicos con partículas de baja densidad en gases de densidad elevada y con partículas de alta densidad en líquidos poco densos.

Otros factores que pueden afectar a la calidad de la fluidización son: la geometría del lecho, el modo de alimentación del gas, el tipo de partícula etc.

2.1.4 Clasificación de las partículas

La clasificación de Geldart es función de la densidad y del tamaño de las partículas. Geldart clasifica las partículas en cuatro grupos distintos, atendiendo a sus propiedades de fluidización en condiciones ambiente.

Las partículas que al ser fluidizadas por aire en condiciones ambiente muestran un estado de fluidización no burbujeante a la velocidad de mínima fluidización, seguido de un estado burbujeante a medida que la velocidad de fluidización aumenta, se clasifican dentro del Grupo A. Las partículas que bajo estas condiciones muestran únicamente fluidización burbujeante forman el Grupo B. El Grupo C lo constituyen partículas muy finas, que son incapaces de fluidizar en sentido estricto. Finalmente, en el Grupo D se incluyen las partículas de gran tamaño que se caracterizan por formar lechos de chorro.

El estado de fluidización burbujeante es el que más comúnmente se encuentra, puesto que el rango de velocidades del gas de fluidización en el que tiene lugar el estado no burbujeante con partículas del Grupo A es pequeño. La velocidad superficial del gas a la que aparecen las primeras burbujas se conoce como velocidad de mínimo burbujeo, U_{mb} .

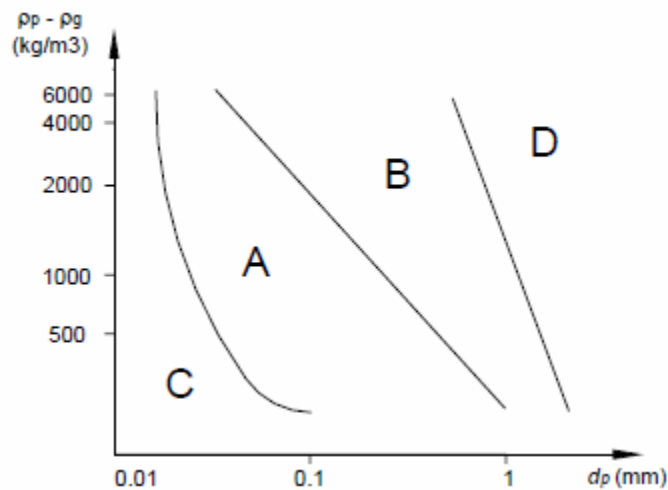


Imagen 2.5. Clasificación de Geldart según densidad y tamaño de las partículas. [2] p.78.

- **Grupo A.** $U_{mb} > U_{mf}$. Las burbujas se dividen y coalescen continuamente existiendo un máximo tamaño de burbuja alcanzado. La fluidización es suave y de calidad.
- **Grupos B y D.** $U_{mb} = U_{mf}$. Las burbujas crecen de manera continua sin existir un límite en cuanto al tamaño máximo alcanzado (sólo el que delimita el ancho del

lecho). Por ello, la fluidización es de peor calidad y se producen mayores fluctuaciones de presión.

- **Grupo C.** Las fuerzas entre partículas son grandes comparadas con las fuerzas de inercia del gas. Así, las partículas no son capaces de alcanzar la separación necesaria y no se produce la fluidización. No aparecen burbujas si no que se forman canales por los que circula el gas a través del lecho. Aún así, la fluidización se puede conseguir con la ayuda de agitadores mecánicos o mediante vibración.

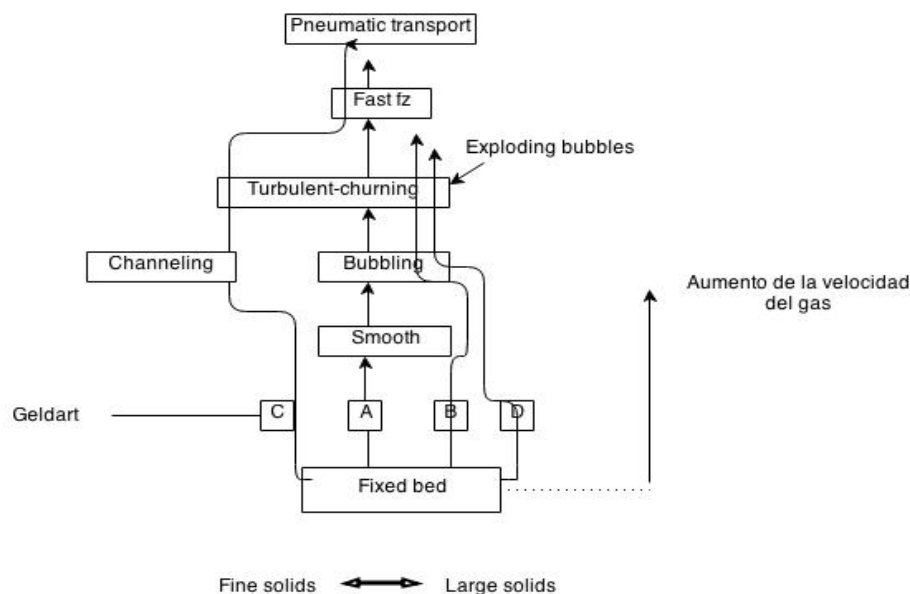


Imagen 2.6. Relación entre la clasificación Geldart de las partículas y los tipos de fluidización. [2] p.90.

2.1.5 Ventajas e inconvenientes de los lechos fluidizados

Ventajas

- El comportamiento suave y fluido que presentan las partículas en estado de fluidización permite un control sencillo.
- El mezclado rápido de las partículas permite alcanzar iguales condiciones de temperatura en todo el lecho.
- Un lecho con partículas bien mezcladas resiste las rápidas variaciones de temperatura, responde lentamente a los cambios bruscos en las condiciones de operación y ofrece un gran margen de seguridad evitando pérdidas de temperatura en reacciones altamente exotérmicas.

- Los lechos fluidos se pueden utilizar en operaciones de gran tamaño.
- Las velocidades de transferencia de calor y masa entre el gas y las partículas son mayores comparados con otros modos de contacto.
- La capacidad de transferencia de calor entre un lecho fluidizado y un objeto inmerso en su interior es alta, con lo cual los intercambiadores de calor en los lechos fluidizados requieren una superficie de transferencia relativamente baja.

Inconvenientes

- El rápido mezclado de partículas en el lecho provoca tiempos de residencia variables. El tratamiento continuo de sólidos proporciona productos no uniformes y un rendimiento bajo, especialmente a altos niveles de conversión.
- La erosión en depósitos y tuberías debida a la abrasión por las partículas puede ser considerable. Por otra parte, las partículas finas en ocasiones son arrastradas por el gas y deben ser reemplazadas por otras.
- El menor coste de operación de los lechos fluidizados frente a otros sistemas es el principal motivo por el que se utiliza en la industria.

2.1.6 Aplicaciones de los lechos fluidizados

La fluidización es utilizada en diversas aplicaciones en distintos sectores de la industria. Desde operaciones físicas como intercambiadores de calor o secado de sólidos hasta operaciones químicas como reacciones de síntesis, craqueo de hidrocarburos etc. A continuación se hace un resumen de estas aplicaciones industriales.

Operaciones físicas

Intercambio de calor

Los lechos fluidizados se han usado para el intercambio de calor debido a sus buenas cualidades para la transferencia rápida de calor y a su capacidad de mantener una temperatura uniforme de operación.

Uno de sus usos frecuentes es el enfriamiento rápido de metales o aleaciones que necesitan este proceso para obtener de ellos unas propiedades concretas. Este proceso, que necesita una gran cantidad de transferencia de calor, se realiza con lechos fluidizados de partículas finas.

Otra de sus aplicaciones prácticas está relacionada con los intercambiadores sin contacto entre partículas, por ejemplo para el calentamiento de un gas o la producción de vapor.

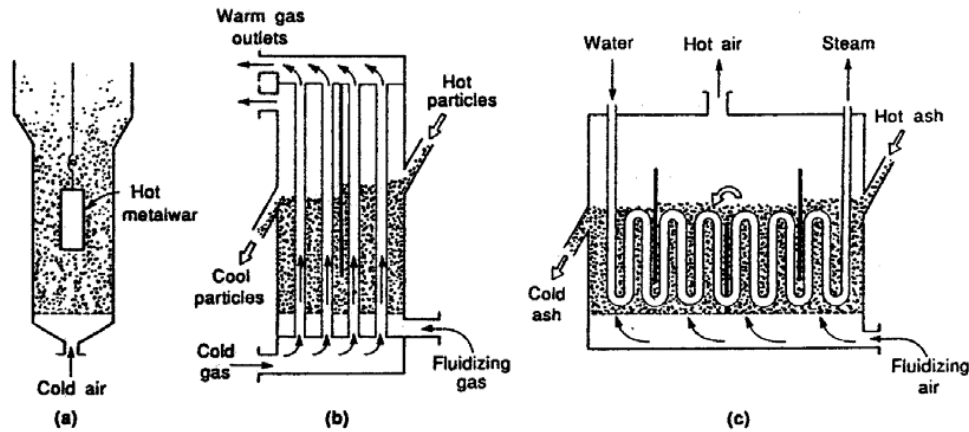


Imagen 2.7. (a) Enfriamiento de metal. (b) Calentamiento de aire. (c) Producción de vapor. [2] p.19.

Recubrimiento de objetos metálicos

Los lechos fluidizados permiten hacer de manera sencilla recubrimientos de plástico en objetos metálicos. Se hacen fluidizar partículas del plástico y se introduce un objeto metálico en el lecho a mayor temperatura que la temperatura de fusión del plástico. Las partículas al entrar en contacto con el metal se fundirán y se adherirán al metal formándose una fina capa que recubrirá el metal.

Secado de sólidos

Los secadores de lecho fluidizado se usan en distintas aplicaciones industriales debido a su gran capacidad de secado, bajo coste de construcción, fácil operatividad y gran eficiencia térmica. Son capaces de secar cualquier tipo de sólido siempre y cuando éste pueda ser fluidizado por un gas caliente.

Existe una gran variedad de diseño de los secadores según su aplicación. Los usos más frecuentes son el secado de polímeros, fertilizantes, arenas, minerales o productos farmacéuticos.

Adsorción

Cuando es necesario eliminar componentes muy diluidos en grandes flujos de gas, se utilizan procesos continuos de adsorción mediante fluidización a través de múltiples

etapas, ya que estos procesos tienen alta efectividad. En la adsorción por lecho fluidizado, los componentes se adsorben de forma activa con partículas de carbón activo y se eliminan posteriormente con vapor. Los ciclos de adsorción y desorción (regeneración del carbón activo) ocurren en el mismo lecho fluidizado.

Reacciones de síntesis

Se utilizan los lechos fluidizados para las reacciones en fase gas con catalizadores sólidos porque éstos son capaces de mantener un estricto control de la temperatura en la zona donde se produce la reacción.

La rápida circulación de las partículas, con capacidad calorífica relativamente alta, distribuye el calor de forma eficiente y ayuda a eliminar las posibles zonas con altas concentraciones de calor.

Craqueo de hidrocarburos

Las reacciones de craqueo presentan dos particularidades: las reacciones son endotérmicas y, además, se produce deposición de carbono en la superficie de los sólidos cercanos. Estas características, junto con las grandes cantidades de material a tratar, determinan el tipo de proceso utilizado industrialmente para estas reacciones. Básicamente, estos procesos se dividen en dos módulos: un primer módulo para la absorción de calor, la reacción y la deposición de carbono, y un segundo donde el carbono depositado se quema y se recupera el calor. Este calor se devuelve al primer módulo mediante las propias partículas en recirculación, y se emplea para llevar a cabo la reacción. La única forma para desarrollar de manera eficiente este proceso es con un sistema de recirculación de partículas mediante uno o más lechos fluidizados. Prácticamente todos los procesos en la actualidad se basan en este principio de operación. Dos tipos de proceso de craqueo son los más utilizados: El Craqueo Catalítico Fluido y el Craqueo Térmico.

Combustión

Combustión de carbón

Debido a la necesidad de encontrar un proceso para combustionar el carbón de mala calidad o combustibles que no se pueden quemar en una caldera convencional de manera eficiente, se comenzó a desarrollar la combustión en lecho fluidizado. Un

diseño típico es el basado en un lecho fluidizado burbujeante a presión atmosférica. En éste, se fluidiza en primer lugar caliza o dolomita mediante aire, y posteriormente, se van inyectando partículas pequeñas de carbón. Debido a las elevadas velocidades de gas con las que operan estas unidades, se produce una pérdida considerable de partículas. Estas partículas que contienen carbono sin quemar, o se atrapan y se queman en celdas diseñadas para ello, o se atrapan y reconducen al lecho por medio de ciclones.

Incineración de residuos sólidos

La incineración de residuos sólidos urbanos es algo inevitable en áreas pobladas. Normalmente se utilizan para este fin quemadores de parrilla, siendo estos eficientes térmicamente, aunque en ocasiones presentan problemas debido a la emisión de olores. Estos problemas pueden ser evitados con incineradores de lecho fluidizado, ya que permiten quemar de forma eficiente combustibles de bajo poder calorífico y de alto contenido en cenizas, como es el caso de los residuos sólidos.

Durante el proceso los residuos son triturados, se retiran los elementos metálicos y se fluidiza el producto resultante en el interior del incinerador. El calor sobrante se evacua del lecho mediante un circuito de agua, de esta manera se aprovecha el exceso de energía mediante la cogeneración. Los sólidos se queman completamente y las cenizas son eliminadas en la parte inferior del lecho. Para mejorar la eficiencia de este tipo de sistemas hay que tratar previamente los residuos con el fin de eliminar los materiales inorgánicos.

Gasificación

Gasificación de carbón

La gasificación de carbón fue una de las primeras aplicaciones de los lechos fluidizados en el ámbito comercial. Este proceso ha sido utilizado para la obtención de gas como combustible aunque, muchas veces, se ha visto desplazado por el mejor rendimiento de otros combustibles como el petróleo o el gas natural. La gasificación es un proceso en el que se quema la materia sólida, con aporte mínimo de oxígeno. El objetivo es eliminar partículas y otras impurezas del combustible sólido y convertirlo en gas, para poder utilizarlo posteriormente tras tratarlo adecuadamente en sistemas de combustión. El producto sólido obtenido denominado Char, está formado por cenizas y residuos de carbón. La gasificación se puede llevar a cabo a través de diferentes agentes, como aire, oxígeno, vapor de agua o hidrógeno.

Gasificación de residuos sólidos

Los residuos urbanos suelen contener materiales tóxicos y dañinos. Por eso, en las plantas de incineración ordinarias es necesario implantar equipos para la limpieza de los gases de escape, de acuerdo con las exigencias medioambientales. No obstante, la limpieza asociada a los gases de combustión en plantas de gasificación resulta mucho más simple y económica debido a que el volumen de gas producido es menor que el volumen que se produce en los incineradores de basuras.

Activación de carbón

La activación del carbón se divide en dos fases: la carbonización de los sólidos precursores y la activación o gasificación del carbonizado. En la carbonización se eliminan elementos como el H_2 y O_2 . Durante la gasificación, el carbonizado se fluidiza con un agente oxidante (aire, oxígeno, vapor de agua) de manera que se eliminan los átomos de carbono, aumentando la superficie específica. Los lechos fluidizados suelen ser unidades multietapa que proporcionan una distribución del tiempo de residencia más uniforme y ayudan a recuperar calor para la gasificación mediante la combustión posterior del CO y H_2 procedente de la carbonización.

Calcinación

Las partículas de caliza y dolomita se pueden calcinar de forma sencilla en un lecho fluidizado quemando directamente combustible en el lecho. La reacción es altamente endotérmica por lo que supone un elevado derroche de combustible. Para recuperarse gran parte del calor se suelen emplear sistemas multietapa. En la etapa de calcinación, que es una de las inferiores, se inyecta combustible que se mezcla con el aire de fluidización quemando las partículas de material. El calor residual sirve para aumentar la temperatura de las partículas de las etapas superiores.

2.2 CONCEPTOS ESPECÍFICOS: TIPOS DE DISTRIBUIDORES

2.2.1 Distribuidores ideales

La mayoría de los estudios a pequeña escala, utilizan para los ensayos de fluidización distribuidores de placa cerámica porosa o de metal sinterizados debido a que tienen una resistencia alta al paso del flujo. Además, consiguen dar una distribución uniforme del gas a través del lecho. Esta situación es la ideal. Muchos otros materiales pueden hacer esto, por ejemplo, distribuidores de tela de filtro, de fibras comprimidas, o incluso un lecho de partículas pequeñas. Algunos de estos materiales deben reforzarse intercalando entre ellos placas de metal con aberturas grandes.

Aunque el contacto gas-sólido es superior con dichos distribuidores, para las operaciones industriales tienen varios inconvenientes:

- Una alta pérdida de carga conduce a un aumento en el requerimiento energético para bombear esa diferencia de presión, a menudo un factor importante en el coste operativo.
- Alto coste de algunos materiales.
- Baja resistividad a tensiones térmicas.
- Posible obstrucción gradual del distribuidor por las partículas o por productos de corrosión.

2.2.2 Distribuidores de placa perforada o de orificios múltiples

Los distribuidores de placa perforada o de orificios múltiples son ampliamente utilizados en la industria debido a que son baratos y fáciles de fabricar.

Según vemos en la figura 2.8(a), el distribuidor consiste en dos placas perforadas que intercalan una pantalla de metal que impide que los sólidos pasen a través de los orificios cuando el flujo de gas se para. El distribuidor de la figura 2.8 (b) utiliza dos placas perforadas escalonadas y sin pantalla intermedia.

Un problema con este tipo de diseño es su falta de rigidez. Placas perforadas grandes flectan inesperadamente cuando se encuentran sometidas a una alta carga, por lo tanto, estos distribuidores necesitan refuerzo para poder aguantar.

Cuando no es práctico tener una estructura de refuerzo para soportar una placa perforada plana, se utilizan distribuidores de placas curvas, tales como el que podemos observar en la figura 2.8(c). Este tipo de distribuidores soportan mucha carga y grandes tensiones térmicas. Como el burbujeo y la formación de canales de paso tienden a ocurrir preferentemente cerca del centro de un lecho fluidizado, este tipo

de diseño ayuda a contrarrestar esta tendencia. Los distribuidores de placa curvada hacia arriba logran un buen contacto sólo cuando está diseñado de tal manera que tenga más orificios cerca del perímetro y menos cerca del centro del lecho, lo que es una gran desventaja para la fabricación.

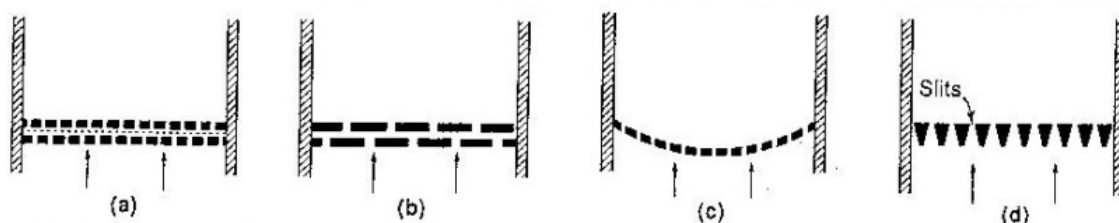


Imagen 2.8. (a) Placas perforadas con pantalla de metal en el centro. (b) Dos placas perforadas escalonadas. (c) Placa perforada curva. (d) Barras de rejillas paralelas. [2] p.96.

Alternativamente, barras de rejillas paralelas, como la figura 2.8 (d), pueden ser utilizadas. Estas barras pueden ser consideradas como versiones en dos dimensiones de unas placas perforadas. Este tipo de diseño ha tenido un uso muy limitado.

El diámetro de los orificios en los distribuidores de placas perforadas puede variar de 1 a 2 mm en pequeños lechos experimentales hasta 50 mm en grandes unidades.

2.2.3 Toberas y “gorras”

Los distribuidores de placa perforada no pueden ser utilizados en condiciones de operación severas, tales como alta temperatura o un entorno altamente reactivo. En estas situaciones, se utilizan distribuidores del tipo tobera.

La placa porosa de múltiples toberas, figura 2.9(a), proporciona una buena distribución de gas por encima de cada agujero, pero se corre el riesgo de que las partículas se queden entre toberas adyacentes. Además, se deben tomar precauciones especiales para asegurar que el gas de entrada esté libre de materiales que puedan obstruir la tobera. Los diseños de las figuras 2.9(b), 2.9(c), 2.9(d), se utilizan con frecuencia ya que evitan que los sólidos caigan a través del distribuidor.

Sin embargo, con todos estos diseños, se corre el riesgo de que las partículas se asienten entre las toberas, se sintericen y se adhieran a la placa del distribuidor.

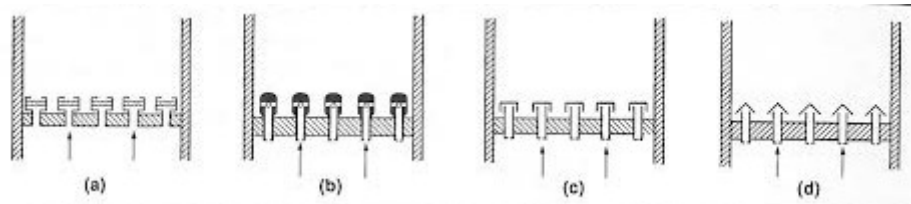


Imagen 2.9 (a) Placa porosa de múltiples toberas. (b) Tipo boquilla. (c) Casquete de burbujeo. (d) Boquilla tipo hendidura. [2] p.97.

2.2.4 Redes de tuberías y rociadores

La experiencia demuestra que tubos internos colocados adecuadamente, mejoran sustancialmente el contacto gas-sólido mediante la ruptura de las burbujas que crecen. De hecho, el diseño adecuado de estos tubos internos puede mejorar la calidad de la fluidización tanto, que no se necesiten distribuidores de alta resistencia. En tales casos, una rejilla de tubo o un tubo rociador, tal como el mostrado en la fig. 2.10(a), puede ser todo lo que se necesita para introducir el gas reactivo en lechos fluidos. Las boquillas de la figura 2.10(b) y 2.10(c), evitan la obstrucción de los rociadores de partículas cuando el flujo de gas se para.

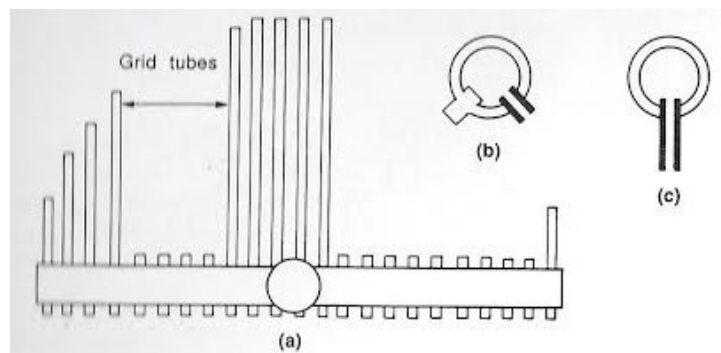


Imagen 2.10 Diseños de tubos rociadores. (b) y (c) tipos de boquillas. [2] p.98.

3. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL:

3.1 Descripción del reactor

El reactor en el que se realizan los ensayos es un reactor bidimensional de ancho $W=300$ mm altura total $H_T=1500$ mm y espesor $e=5$ mm. La pared frontal es de cristal y su pared posterior es de aluminio de color negro. Las condiciones a las que opera son a presión y temperatura ambiente. El aire a presión entra a través del plenum, que es una cámara cerrada de aluminio, colocada debajo de la columna del reactor, en la que se dispone un tubo conectado al sistema de alimentación exterior de aire que distribuye lo más homogéneamente posible el aire antes de pasar por el distribuidor. Tras pasar por el distribuidor, el aire entra en el reactor donde se encuentran las partículas que conforman el lecho. El reactor está preparado para poder tomar señales de presión tanto en el plenum como a distintas alturas de la columna del reactor.

3.2 Descripción de las partículas

Las partículas utilizadas en el ensayo son microesferas de vidrio de diámetro de partícula, d_p , $400 - 600 \mu\text{m}$ y densidad, $\rho_p=2500 \text{ Kg/m}^3$. Estas partículas son del tipo B según la Clasificación Geldart. Se identifican por un comienzo del burbujeo al inicio de la fluidización, de tal manera que la velocidad de mínima fluidización y de burbujeo coincide. La expansión del lecho es moderada y el crecimiento de burbuja no tiene límite de tamaño exceptuando el que marca el ancho del lecho.

Un parámetro característico de las partículas que ayuda a definir el comportamiento del lecho es la fracción de vacío, ε . Este parámetro define, para un volumen determinado en el que se introducen partículas, cuánta cantidad respecto del total la conforma el gas. Para su cálculo, se relaciona la densidad aparente del lecho, ρ_b , con la densidad de partículas según la siguiente ecuación:

$$\rho_b = (1 - \varepsilon)\rho_p \quad [3.1]$$

La densidad aparente del lecho, ρ_b , será el cociente entre la masa aparente de las partículas del lecho y el volumen aparente del lecho, V_b , que las contiene ($L \times W \times e$):

$$\rho_b = \frac{m_b}{V_b} \quad [3.2]$$

Esta relación se puede obtener experimentalmente si, conocido un determinado volumen (un matraz calibrado), lo llenamos de partículas y lo pesamos en una báscula. Esta relación será extrapolable al volumen aparente del lecho.

Tras realizar este ensayo obtenemos que:

$$\rho_b = \frac{m_b}{V_b} = 1430 \text{ Kg/m}^3$$

Por lo tanto, volviendo a la ecuación [3.1], obtenemos la fracción de vacío:

$$\varepsilon=0,428$$

Partículas	d_p (μm)	ρ_p (Kg/m^3)	ρ_b (Kg/m^3)	ε
Microesferas de vidrio	400-600	2500	1430	0,428

3.3 Descripción del distribuidor

El distribuidor empleado en el ensayo es un distribuidor de aluminio de orificios múltiples con alta pérdida de carga cuyas medidas principales son: ancho total $W_d=300$ mm, espesor $e_d=5$ mm, que tiene 29 agujeros de diámetro $d_t=500$ μm cada uno, cuya separación entre centros es de 10 mm. Se coloca entre el plenum y la columna del reactor y su función es la de distribuir de manera homogénea el aire en el lecho.

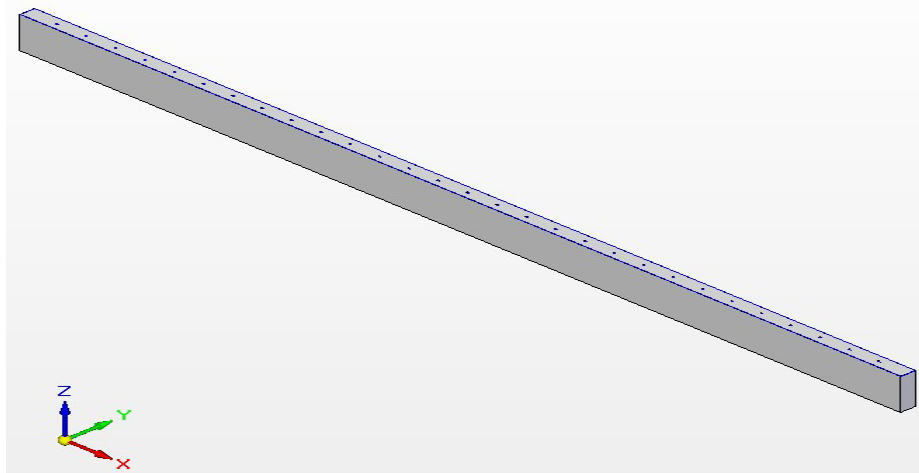


Imagen 3.2. Vista del distribuidor utilizado en el ensayo.

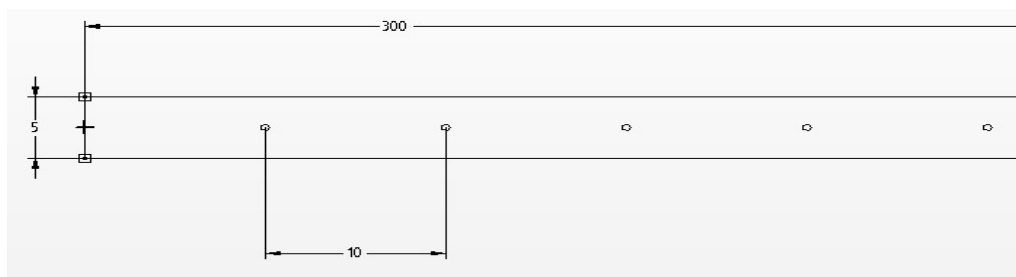


Imagen 3.3. Medidas principales del distribuidor (mm).

En el ensayo se han estudiado cuatro configuraciones distintas de disposición de los agujeros abiertos homogéneamente distribuidos en ternas de agujeros. Se busca que la relación entre el área abierta y el área total de las cuatro configuraciones del distribuidor sea lo más parecida posible para que en lo referente a la pérdida de carga del distribuidor la influencia de una posible variación en el número total de agujeros abiertos sea lo más pequeña posible. Cabe decir que se asume esta variación y se supone una misma pérdida de carga para las cuatro configuraciones del distribuidor.

- Configuración 1 del distribuidor

O X O X O X O X O X O X O X O X O X O X O X O X

$$r_1(\%) = \frac{A_{ab1}}{A_t} \cdot 100 = \frac{N_{a1}}{N_t} \cdot 100 = \mathbf{51,724\%}$$

- Configuración 2 del distribuidor

X X O O X X O O X X O O X X O O X X O O X X O O

$$r_2(\%) = \frac{A_{ab2}}{A_t} \cdot 100 = \frac{N_{a2}}{N_t} \cdot 100 = \mathbf{48,276\%}$$

- Configuración 3 del distribuidor

X O O O X X X O O O X X X O O O X X X O O O X X X O O O X

$$r_3(\%) = \frac{A_{ab3}}{A_t} \cdot 100 = \frac{N_{a3}}{N_t} \cdot 100 = \mathbf{51,724\%}$$

- Configuración 4 del distribuidor

O X X X X O O O O X X X X O O O O X X X X O O O O X X X X

$$r_4(\%) = \frac{A_{ab4}}{A_t} \cdot 100 = \frac{N_{a4}}{N_t} \cdot 100 = \mathbf{44,828\%}$$

3.4 Sistema de alimentación de aire

La presión de la línea general de aire son, aproximadamente, 3 bares. Esta presión es suficiente para obtener los niveles de caudal necesarios que vamos a utilizar en el ensayo.

El nivel de caudal es un parámetro muy importante tanto para el cálculo de la mínima fluidización como para la grabación de imágenes a las condiciones de velocidad definida y, por ello, utilizamos un **caudalímetro** para regularlo. Este medidor de caudal, *SMC Switch Flow*, está ajustado para medir un valor mínimo de 10L/min y un valor máximo de 200L/min con una precisión de 2L/min.

Tras pasar por el caudalímetro, hacemos pasar el aire por un **humidificador**. Esto ayuda a que el aire entre húmedo al lecho y así el contacto de las partículas no produzca un rozamiento excesivo que pueda rallar el reactor. Además, con el aire húmedo se evita parte de la electricidad estática que se genera por el movimiento de las partículas del lecho. La electricidad estática es necesario evitarla para poder realizar la grabación de imágenes sin que las partículas se queden adheridas a las paredes del lecho y desvirtúen los resultados.

Tras pasar por el humidificador, el aire llega al plenum y pasa a través del distribuidor hasta llegar al lecho.

- Relación entre el nivel de caudal Q (L/min) y la velocidad superficial del gas U (m/s) en nuestro lecho:

$$Q\left(m^3/s\right)=Q(L/min)\cdot\frac{10^{-3}m^3}{1L}\cdot\frac{1\min}{60s}=\frac{Q(L/min)}{60000}$$

$$\text{Si } A = W \cdot e = 0,3 \cdot 0,005 = 0,0015 \text{ m}^2$$

$$U(m/s) = \frac{Q\left(m^3/s\right)}{A(m^2)} = \frac{Q(L/min)}{60000 \cdot 0,0015} = \frac{Q(L/min)}{90}$$

3.5 Sistema de adquisición de datos

Dos tipos de datos vamos a adquirir en el ensayo: Datos de presión e imágenes.

Datos de presión

Los datos de presión se adquieren por medio de dos **sensores de presión**. Los sensores recogen las señales de presión en dos orificios del lecho. Uno de ellos está en el plenum y el otro en la parte posterior de la columna, Altura 1 del lecho (4 cm por encima del distribuidor). La posición de medición será la misma durante todo el ensayo. Las señales de presión son recogidas por la **tarjeta de adquisición**, marca National Instruments, modelo Ni 9205. La tarjeta de adquisición se conecta a un **bastidor** de la misma marca y modelo NI cDAQ-9172. El bastidor alimenta la tarjeta y se encarga de transmitir las señales medidas a través de un cable USB hasta el ordenador.

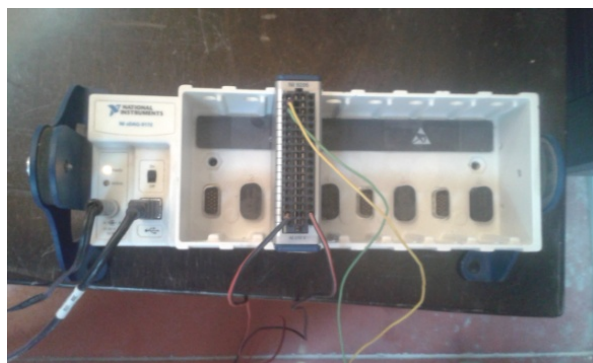


Imagen 3.4. Bastidor y tarjeta de adquisición.

Imágenes

Para la captura de imágenes se utiliza una cámara de alta velocidad de la marca **BASLER AG**. La cámara se colocará sobre un trípode que permita ajustar su posición de tal manera que enfoquemos siempre el centro del lecho. La captura de imágenes se ha realizado a 100fps (imágenes por segundo). Para conseguir luz lo más homogénea posible, se ha iluminado el lecho durante la grabación con **dos focos** de luz colocados en frente del lecho sin que este reciba la luz directa para que el cristal frontal no refleje la luz durante la grabación.



Imagen 3.5. Captura de imágenes. Iluminación.

Tanto las imágenes como las señales de presión son adquiridas y tratadas por una aplicación programada en **Labview** facilitada por la Universidad. Este programa permite generar los valores de presión en formato *.txt* y las imágenes en formato *.jpg*.

El posterior tratamiento de las imágenes y de los valores de presión se realizará mediante el uso de **MATLAB**.

3. 6 ESQUEMA GENERAL DE LA INSTALACIÓN

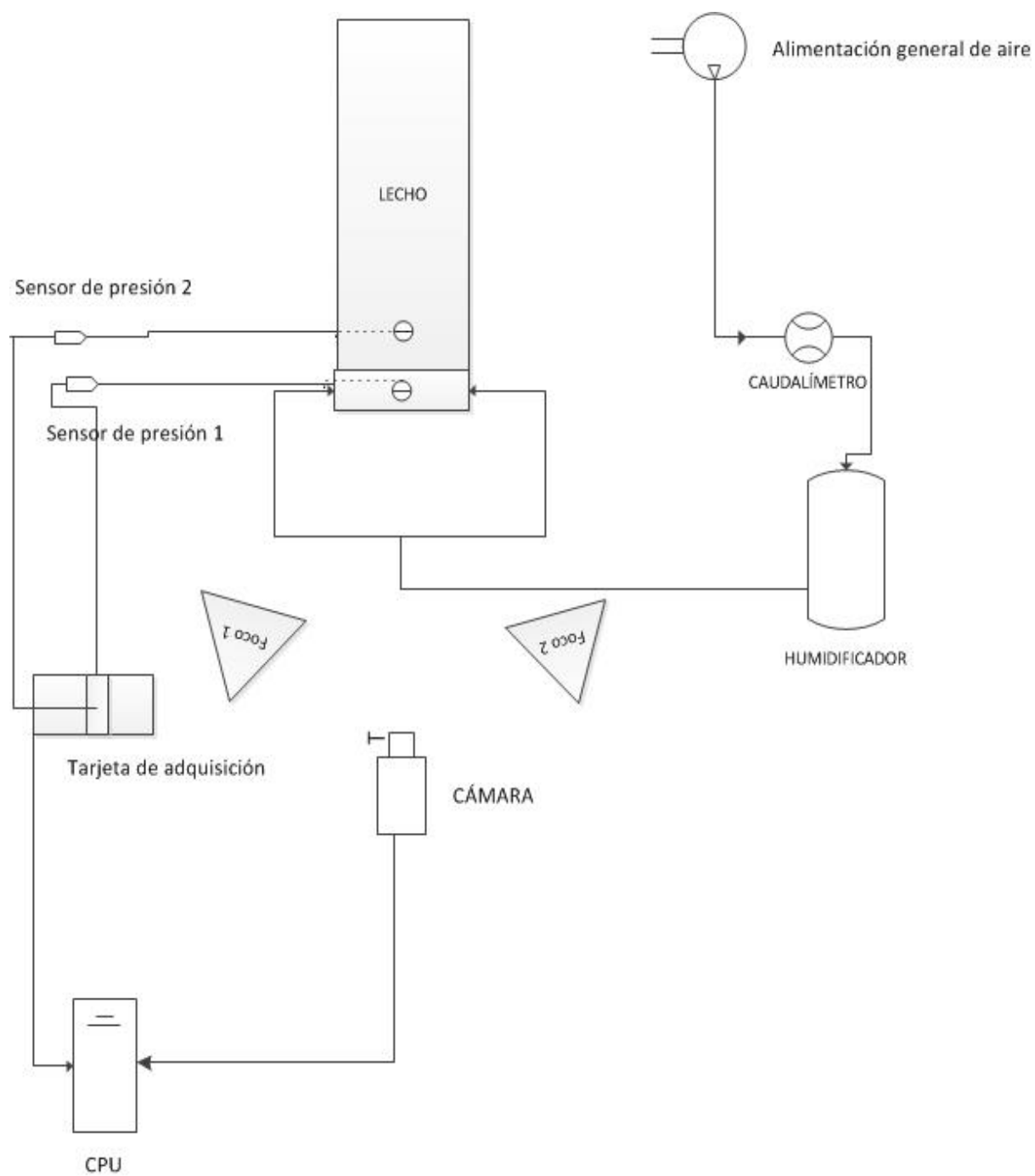


Imagen 3.6 Esquema general de la instalación.

4. VELOCIDAD DE MÍNIMA FLUIDIZACIÓN:

4. MÍNIMA FLUIDIZACIÓN

La velocidad de mínima fluidización, U_{mf} , es la velocidad superficial del gas a la que el lecho comienza a fluidizar. En este capítulo se realizará el cálculo de esta velocidad mediante el método teórico, observando la influencia de la variación de parámetros de operación del lecho. Además, se calculará esta velocidad a través del método experimental de la pérdida de carga en el lecho, el cual se implementa a través de un ajuste lineal de las curvas de pérdida de carga del lecho frente a la velocidad superficial del gas. Además, se observará la posible influencia de las paredes del lecho en la pérdida de carga del distribuidor. Se realizará una comparación, a través de los resultados obtenidos, entre el método teórico y experimental.

4.1 Descripción de la toma de medidas

Pérdida de carga del distribuidor

- Frecuencia de muestreo: 2000 Hz
- Caudales medidos (L/min): 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140.
- Velocidades superficiales del aire correspondientes (m/s): 0.222, 0.444, 0.667, 0.889, 1.111, 1.333, 1.556.
- Tiempo de medición: 30 segundos por cada caudal medido.
- Medidas de presión absoluta tanto en el plenum como en la altura 1 del reactor.

Cálculo de la mínima fluidización

- Frecuencia de muestreo: 2000 Hz
- Caudales medidos: 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42, 44, 46, 48, 50, 54, 58, 62, 66, 70, 80 (L/min)
- Velocidades superficiales del aire correspondientes (m/s): 0.1778, 0.2, 0.222, 0.244, 0.266, 0.288, 0.311, 0.333, 0.355, 0.377, 0.4, 0.422, 0.444, 0.466, 0.488, 0.511, 0.5333, 0.555, 0.6, 0.644, 0.688, 0.733, 0.777, 0.888.
- Tiempo de medición: 30 segundos por cada caudal medido.
- Configuraciones de distribuidor usadas: Configuración 1, Configuración 2, Configuración 3, Configuración 4.
- Alturas de lecho: 30, 40 y 50 cm.
- Medición tanto para la fluidización como para la defluidización.
- Medidas de presión absoluta tanto en el plenum como en la Altura 1 del reactor.

4.2 Cálculo de la pérdida de carga en el distribuidor

Para calcular la pérdida de carga en el distribuidor se debe colocar un sensor de presión en el plenum y otro en la Altura 1 de la columna del reactor y se hace circular el aire a través del reactor vacío de partículas a distintas velocidades de aire.

La diferencia entre los dos puntos de medición de presión nos dará la pérdida de carga del distribuidor para distintas velocidades superficiales del gas. Al graficar los datos, obtendremos una curva con datos discretos que se asemejará a una curva del tipo $Y = cte \cdot X^2$, donde Y será la pérdida de carga y X la velocidad. Realizando un ajuste de los datos a ese tipo de curva mediante la herramienta Curve Fitting de MATLAB podremos obtener una función que representará la pérdida de carga del distribuidor. $\Delta P = cte \cdot U^2$.

Influencia de las paredes del lecho en la pérdida de carga del distribuidor

Si no estuviese el lecho, la presión tras el distribuidor sería la presión atmosférica. Cómo influye su presencia podemos estudiarlo si, siguiendo el mismo procedimiento que antes para hallar la relación de la pérdida de carga con la velocidad, ahora no consideramos la presión en la altura 1 del lecho y únicamente tenemos en cuenta la presión del plenum.

4.3 Cálculo de la velocidad de mínima fluidización: Método teórico

La velocidad de mínima fluidización define el paso del estado de lecho fijo al de lecho fluidizado. En este instante, la fuerza de arrastre que provoca el ascenso del gas es igual al peso de las partículas.

La pérdida de carga en el lecho fijo se relaciona con la velocidad del gas mediante la ecuación de Ergun:

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu_g U_0}{(\phi_s d_p)^2} + 1.75 \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho_g U_0^2}{\phi_s d_p} \quad [4.1]$$

La pérdida de carga en el lecho fluidizado será igual al peso de la columna de partículas del lecho y queda definida por la siguiente ecuación:

$$\frac{\Delta P}{L} = (1 - \varepsilon_{mf}) \cdot (\rho_p - \rho_g) \cdot g \quad [4.2]$$

Por tanto, es posible obtener una expresión para el cálculo de la velocidad de mínima fluidización igualando la expresión de pérdida de carga en el lecho fijo particularizada

para las condiciones de mínima fluidización, con la expresión de pérdida de carga en el lecho fluidizado. Así, se obtiene:

$$(1 - \varepsilon_{mf}) \cdot (\rho_p - \rho_g)g = 150 \cdot \frac{(1 - \varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\mu_g U_{mf}}{(\phi_s d_p)^2} + 1,75 \cdot \frac{(1 - \varepsilon_{mf}) \rho_g U_{mf}^2}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \phi_s d_p} \quad [4.3]$$

Siendo el número de Reynolds en el comienzo de la fluidización:

$$Re_{mf} = \frac{U_{mf} d_p \rho_g}{\mu_g} \quad [4.4]$$

Se puede escribir la ecuación del siguiente modo:

$$(1 - \varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho_g) \frac{\rho_g d_p^3}{\mu_g^2} = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \phi_s^2} Re_{mf} + 1,75 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \phi_s} Re_{mf}^2 \quad [4.5]$$

Si a continuación, definimos el número de Arquímedes como:

$$Ar = \frac{\rho_g (\rho_p - \rho_g) d_p^3}{\mu_g^2} \quad [4.6]$$

Podemos escribir la ecuación del siguiente modo:

$$Ar = \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \phi_s^2} Re_{mf} + \frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \phi_s} Re_{mf}^2 \quad [4.7]$$

Al observar las ecuaciones, nos damos cuenta que el cálculo teórico de la velocidad de mínima fluidización depende únicamente de las características de las partículas (densidad ρ_p , diámetro de la partícula d_p , esfericidad ϕ_s y la fracción de vacío al comienzo de la fluidización ε_{mf}) y de las características del fluido (densidad ρ_g y viscosidad del gas μ_g). La fracción de vacío al comienzo de la fluidización, debido a la dificultad de cálculo de la misma, se supondrá igual a la fracción de vacío del lecho fijo, ε , calculada en el capítulo 3.2.

Nuestro valor referencia teórico para la comparación con el método experimental será el que obtengamos a partir de las siguientes características:

- ρ_g y μ_g a Temperatura y presión ambiente.
- $d_p = 500 \mu\text{m}$.
- $\phi_s = 1$.
- $\varepsilon_{mf} = \varepsilon = 0,428$.

La implementación de la ecuación [4.7] se realizará en MATLAB de tal modo que, mediante un proceso iterativo, se obtenga el valor de la velocidad de mínima fluidización que cumpla la igualdad.

4.4 Cálculo de la velocidad de mínima fluidización: Método experimental de la pérdida de carga en el lecho.

Este método experimental, al igual que el método teórico de Ergun, realiza un análisis de los estados de lecho fijo y lecho fluidizado. El proceso experimental consiste en realizar medidas de la presión a diferentes velocidades superficiales del gas, velocidades que deben encontrarse tanto dentro del estado de lecho fijo como del estado de lecho fluidizado.

La pérdida de carga en el lecho la obtenemos a partir de la medida de presión absoluta en el plenum y la pérdida de carga en el distribuidor, relacionándose de la siguiente manera:

$$\Delta P_{lecho} = P_{plenum} - \Delta P_{distribuidor}$$

Al enfrenar los valores de la pérdida de carga con los de la velocidad del gas, se obtienen curvas similares a la de la siguiente figura 4.1:

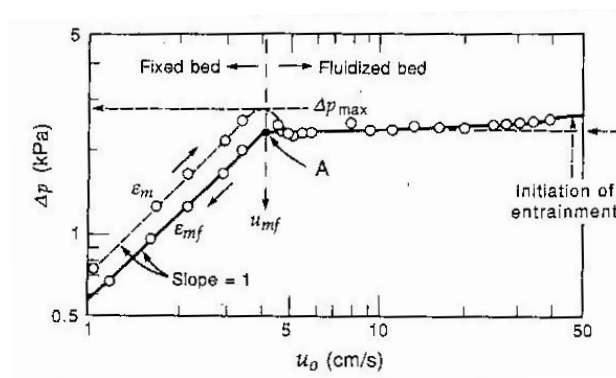


Imagen 4.1 Curva pérdida de carga del lecho frente a la velocidad del gas. [2] p.71.

La parte de lecho fijo presenta un camino ascendente (Fluidización) y otro descendente (Defluidización) de valores proporcionales a la velocidad del gas hasta llegar a unos valores de presión que comienzan a ser constantes (comienzo de fluidización). La diferencia entre la fluidización y defluidización se debe a la dificultad de hacer fluidizar un lecho desde cero, ya que presenta mayor resistencia y por tanto mayores valores de pérdida de carga. En este trabajo, la parte de lecho fijo tanto para la fluidización como para la defluidización, se ha aproximado mediante un ajuste lineal de los puntos a una recta oblicua con su origen en 0 ($y=m \cdot x$).

La parte de lecho fluidizado, se suele aproximar a una recta constante y de valor igual al valor de presión que provoca el peso de la columna de partículas [4.2]. Así, la velocidad de mínima fluidización se encuentra en el corte de las dos rectas.

En este trabajo se considera que, debido a las posibles diferencias entre la fracción de vacío en lecho fijo y en mínima fluidización, los posibles errores en la obtención de la fracción de vacío de lecho fijo, y la consideración de que experimentalmente el lecho en régimen fluidizado debe comportarse siguiendo esta tendencia constante, se realiza un ajuste lineal de los puntos de la curva sin tener en cuenta la recta de valor igual a la presión de la columna de partículas. Así, se realizará un ajuste a una recta $y=cte$ que pase por los puntos que se encuentren dentro del estado de lecho fluidizado.

Como ejemplo de cálculo, las siguientes imágenes correspondientes al ajuste lineal usando la herramienta Curve Fitting de Matlab.

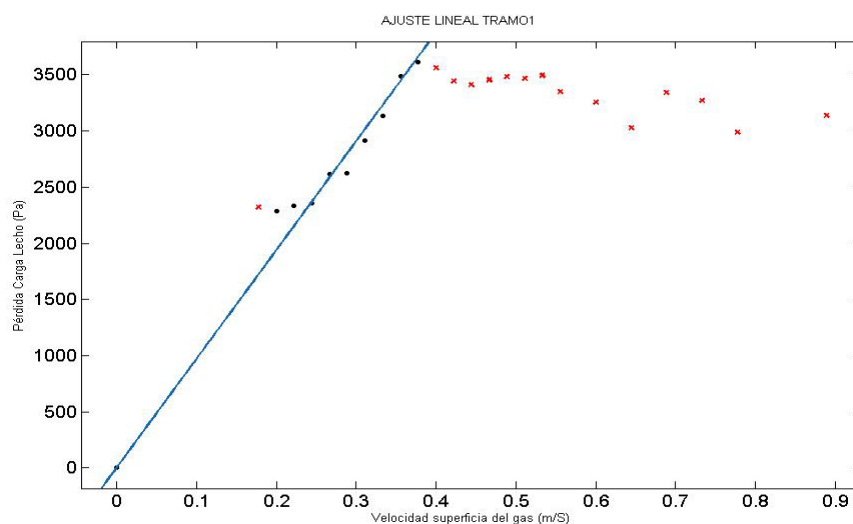


Imagen 4.2 Ejemplo de ajuste lineal. Tramo 1: Lecho fijo.

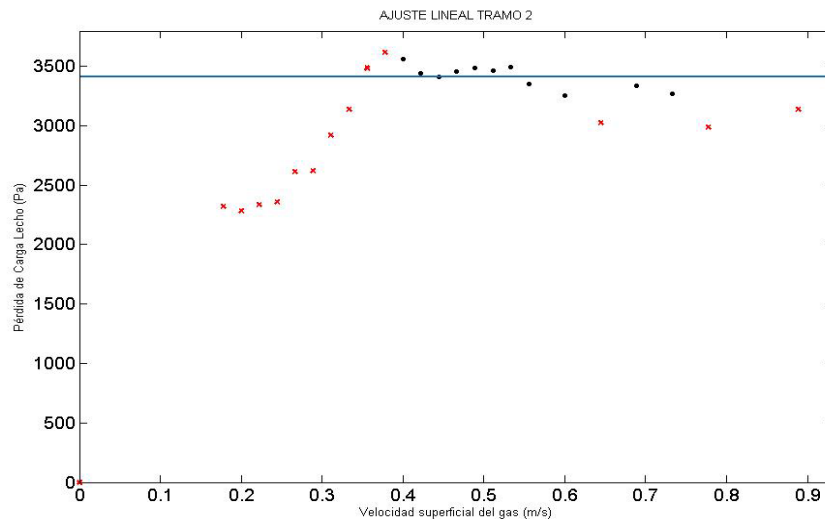


Imagen 4.3. Ejemplo de ajuste lineal. Tramo 2: Lecho fluidizado.

Como podemos observar a velocidades superficiales del gas muy altas es posible que los valores de presión no sigan una tendencia constante. A velocidades 2,5 veces mayores que la velocidad de mínima fluidización es posible que el lecho se encuentre en la frontera entre régimen burbujeante y régimen turbulento. Esto conlleva un movimiento más vigoroso de las partículas del lecho y la formación de canales de paso de aire que pueden variar bruscamente los datos de presión que recogen los sensores.

Se ha seguido el mismo procedimiento de cálculo de la velocidad de mínima fluidización para los 24 casos definidos: Para cada configuración del distribuidor, para cada relación de aspecto y tanto para la fluidización como la defluidización del lecho de partículas.

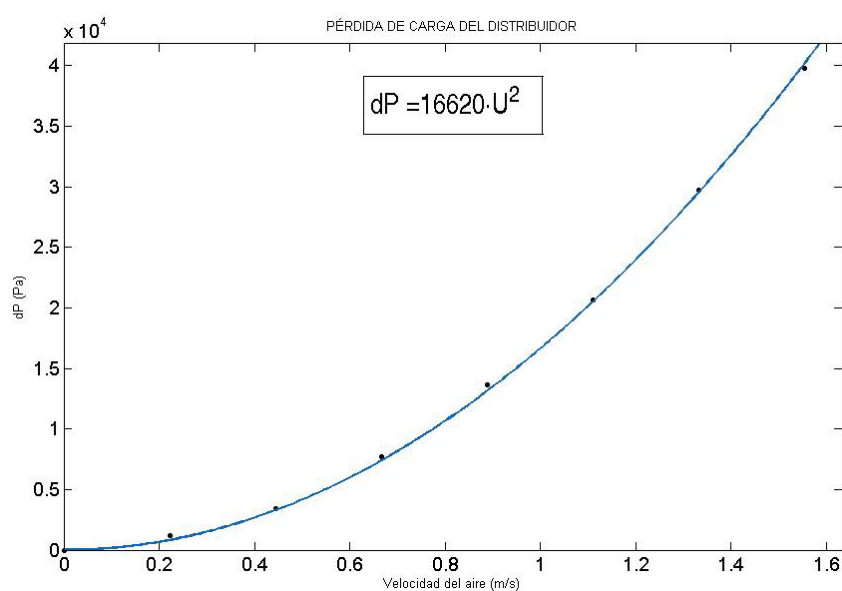
No es objeto de estudio la posible influencia de las distintas configuraciones de agujeros estudiadas en la velocidad de mínima fluidización.

4. 5 Resultados

PÉRDIDA DE CARGA DEL DISTRIBUIDOR

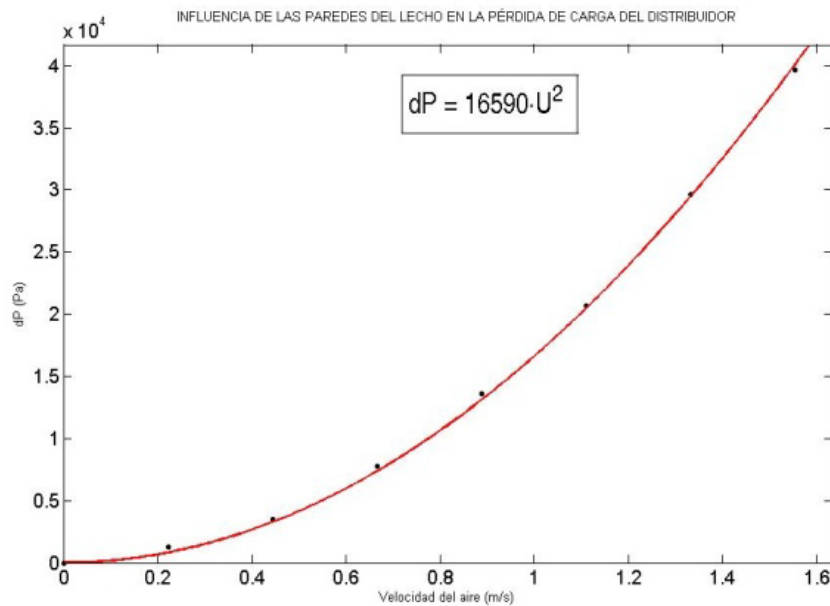
Caudal (L/min)	Velocidad (m/s)	ΔP distribuidor (Pa)
0	0	0
20	0,2222	1186,159952
40	0,4444	3448,438209
60	0,6667	7728,597473
80	0,8889	13613,31371
100	1,1111	20656,28491
120	1,3333	29695,43709
140	1,5556	39803,38848

La pérdida de carga del distribuidor queda definida con la curva $\Delta P = 16620 \cdot U^2$ como se ve en la siguiente imagen.



Pérdida de carga del distribuidor en relación a la velocidad superficial del aire.

Para determinar la influencia de las paredes del lecho en la pérdida de carga del distribuidor se sigue el procedimiento descrito y se calcula su curva característica:



Influencia de las paredes del reactor en la pérdida de carga.

ΔP distribuidor con paredes (Pa)	ΔP distribuidor sin paredes (Pa)	Diferencia (%)
$16620 \cdot U^2$	$16590 \cdot U^2$	0,1805

La influencia de las paredes del lecho en la pérdida de carga del distribuidor es prácticamente despreciable. Esto quiere decir que la presión dentro del reactor cuando hacemos pasar el gas a distintas velocidades es prácticamente la atmosférica.

Como se ha explicado en el capítulo 3.3, se considera que la pérdida de carga del distribuidor para las cuatro configuraciones es la misma aunque puedan existir diferencias debido a que en las configuraciones 2 y 4 el número de agujeros abiertos es menor y por lo tanto el área abierta difiere de las configuraciones 1 y 3.

VELOCIDAD DE MÍNIMA FLUIDIZACIÓN

A continuación, se muestran los valores de la velocidad de mínima fluidización obtenidos con el método teórico y con el método experimental.

- RESULTADO TEÓRICO

Resultado obtenido bajo las siguientes condiciones de operación:

- ρ_g y μ_g a Temperatura y presión ambiente.
- $d_p = 500 \mu\text{m}$.
- $\phi_s = 1$.
- $\varepsilon_{mf} = \varepsilon = 0,428$.

$$U_{mf} = 0,313 \text{ m/s}$$

Variación de la velocidad de mínima fluidización teórica variando algunas de las condiciones de operación:

- Si $d_p = 450 \mu\text{m}$ y resto de parámetros iguales: $U_{mf} = 0,254 \text{ m/s}$.
- Si $d_p = 550 \mu\text{m}$ y resto de parámetros iguales: $U_{mf} = 0,378 \text{ m/s}$.
- Si sólo variamos la esfericidad $\phi_s = 0.9$: $U_{mf} = 0,2535 \text{ m/s}$.

- RESULTADOS EXPERIMENTALES

	Configuración 1		Configuración 2		Configuración 3		Configuración 4	
Altura (cm); L/W	F	D	F	D	F	D	F	D
30; L/W=1	0,347	0,363	0,307	0,312	0,29	0,291	0,345	0,315
40; L/W=1,33	0,302	0,335	0,311	0,311	0,304	0,305	0,328	0,345
50; L/W=1,66	0,339	0,334	0,327	0,328	0,347	0,324	0,332	0,329

*Velocidad en (m/s); **F = Fluidización; ***Defluidización.

- COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES ENTRE SÍ:

- Media: $\bar{X}=0,3228$
- Desviación Típica: $\sigma=0.0191$
- Coeficiente de variación: $C_v(\%) = \frac{\sigma}{\bar{X}} = 5,894 \%$
- Variación máxima (%) = 12,45 %

- COMPARACIÓN RESULTADO TEÓRICO CON EXPERIMENTALES:

- Variación media: 5,684 %
- Variación máxima: 15,97%

4.6 Conclusiones

Vemos como los valores de la velocidad de mínima fluidización presentan diferencias al calcularlo a través del método teórico o el método experimental de la pérdida de carga en el lecho.

No se pretende realizar un análisis en el que tener en cuenta las diferencias existentes ni entre las distintas configuraciones del distribuidor usadas ni entre las distintas alturas de lecho utilizadas. Los valores de velocidad de mínima fluidización difieren, visto desde un punto de vista teórico-experimental, un 5,684% de media y sufren una variación máxima con respecto al valor teórico de un 15,97%. El cálculo de la velocidad de mínima fluidización, siempre presenta rangos de incertidumbre elevados por la cantidad de factores que influyen en su correcta obtención tanto en el método teórico como en el método experimental.

Así, si observamos el cálculo del valor teórico tenemos que tener en cuenta factores que pueden variar ostensiblemente el valor final que obtengamos, como el diámetro de partícula, la esfericidad de las partículas, la fracción de vacío a mínima fluidización, las condiciones ambientales a las que se desarrolla el ensayo etc.

En relación al método experimental, además, también influyen distintas consideraciones técnicas del ensayo. Por ejemplo, el llenado del lecho de manera no homogénea, el empacamiento del lecho de tal manera que esté lleno de más partículas que las que realmente debería haber para una determinada altura. La línea de aire puede no entregar el caudal requerido ya que pueden existir pérdidas de aire no visibilizadas durante el ensayo.

Los sensores de presión pueden recoger la información de que el lecho esté fluidizado completamente aunque el lecho sufra una fluidización parcial.

Incluso en estudios hidrodinámicos de lechos fluidizados cuyo uno de sus objetivos principales es conocer lo más precisamente posible este valor, se presentan errores entre medidas dentro de un rango cercano al de este trabajo; [11] y [13].

Es importante comprender que a la hora de enfrentarnos a la velocidad de mínima fluidización, es muy difícil obtener resultados exactos y que, por tanto, hay que tener en cuenta un rango de incertidumbre alrededor de cualquier valor que calculemos.

Además, el estudio de la velocidad de mínima fluidización en este trabajo se utiliza como medio para conocer las condiciones operativas en lo referente al exceso de aire para el posterior análisis en los capítulos 5 y 6. Como veremos, se realizará una consideración en lo referente a la velocidad de mínima fluidización usada, que se aplicará en los excesos de aire analizados tanto en el capítulo 5 como en el 6, y que se encuentra detallada en el punto 5.6 del trabajo.

5. PATRONES GENERALES DE FLUJO DE LAS BURBUJAS EN EL LECHO:

5.1 Introducción

En muchas aplicaciones el rendimiento de los lechos fluidizados depende del comportamiento de burbujeo, por lo tanto, para realizar un buen control de las aplicaciones y una mejora del rendimiento del proceso es necesario conocer detalladamente el contacto entre el gas y las partículas en este régimen de fluidización.

Haciendo un repaso bibliográfico vemos como Kunii et al. [2], hicieron una breve generalización sobre los movimientos de la emulsión (gas + partículas) según el tipo de partículas o la relación de aspecto entre el alto y el ancho del lecho.

Las primeras observaciones de los lechos burbujeantes, indicaban que todo el gas en exceso sobre la velocidad de mínima fluidización, es decir, $U_o - U_{mf}$, pasaba a través del lecho en forma de burbujas y las partículas se mantenían en condiciones de mínima fluidización, sin moverse excepto cuando la burbuja pasaba a través de ellas. Este modelo se conoce como el modelo simple de dos fases.

Experimentos posteriores han ido demostrando que en el contacto gas sólido las cosas son más complejas.

Movimientos de la emulsión con partículas Geldart B y Geldart A

Numerosos estudios en lechos mayores de 30 cm de alto han demostrado que la primera aproximación del modelo simple de dos fases está equivocado ya que:

- El gas de las burbujas no está dado por el exceso de aire, $U_o - U_{mf}$.
- La fracción de vacío de la emulsión, \mathcal{E}_e , no es igual a la fracción de vacío de mínima fluidización, \mathcal{E}_{mf} , cuando la velocidad del gas es mayor que la velocidad de mínima fluidización.
- La emulsión no permanece estancada y desarrolla patrones de flujo del gas diferentes, inducidos por el aumento irregular de burbujas o por la formación de canales por las mismas.

Estos resultados no son del todo consistentes debido a que se pueden producir comportamientos diferentes según el tipo de partículas, su tamaño, sus características y el comportamiento del gas. Aun así, se pueden hacer algunas generalizaciones:

Werther y Molerus [3] utilizaron un distribuidor de placa porosa con alta pérdida de carga, el cual suponía una distribución uniforme del gas a través del lecho. Sin embargo, como podemos observar en la imagen 5.1, se encontraron con un flujo ascendente de burbujas que comenzaba muy cercano a las paredes del reactor y que

acababa desplazándose hacia el centro del lecho según ascendía a la superficie superior.

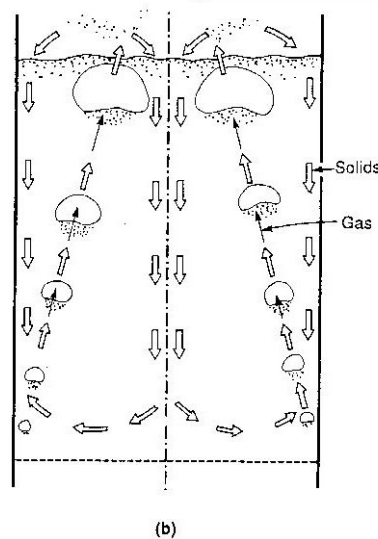


Imagen 5.1. Patrón general del movimiento de la emulsión. Werther y Molerus. [2] p.138.

Whitehead, Yamazaki et al. [4], usando partículas de tipo B de la clasificación de Geldart, encontraron unos patrones de circulación de la emulsión similares a los anteriores.

Con estos y otros estudios se pueden hacer las siguientes generalizaciones de los movimientos de flujo de la emulsión en lechos fluidizados de partículas Geldart B. Partículas del mismo tipo que las ensayadas en este trabajo.

- A bajas velocidades de fluidización y en lechos con relación de aspecto (Altura/Ancho) cercanas a la unidad, pero menores que ella, las partículas circulan por la acción de las burbujas como un vórtice en forma de anillo ascendiendo cerca de las paredes laterales y descendiendo por el centro del lecho; Ver Figura 5.2 (a). Sin embargo, a altas velocidades de fluidización estos patrones de flujo pueden revertirse debido a la presencia de unas burbujas mucho más grandes; Ver Figura 5.2 (b).
- Para relaciones de aspecto cercanas a la unidad, las partículas tras llegar a la superficie superior del lecho, comienzan a descender por las paredes del reactor. Aun así, el movimiento ascendente de las burbujas formando los dos caminos preferenciales, provoca que las partículas preferentemente descendan por el centro del lecho. Este patrón de ascenso se definirá como **modelo de ascenso de dos columnas**; Figura 5.2 (c).

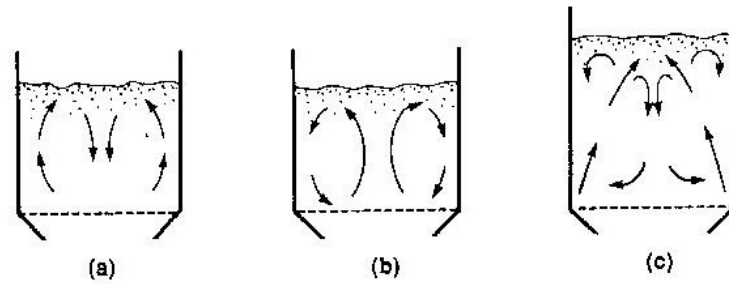


Imagen 5.2 Movimiento de la emulsión en lechos fluidizados. (a) $L/W \approx 1$, baja velocidad. (b) $L/W \approx 1$, alta velocidad. (c). $L/W = 1$. Modelo de dos columnas. [2] p.140.

- Para lechos profundos, donde la relación de aspecto es mayor que uno, comienza a formarse un nuevo patrón de flujo por encima del vórtice original. Este nuevo patrón es de flujo ascendente por el centro del lecho. Este ascenso de las burbujas por el centro del lecho provoca que las partículas se muevan formando dos vórtices en forma de anillos a los lados del flujo central, como indica la figura 5.3. Cuando nos encontramos a altas velocidades de gas, este nuevo patrón de flujo domina el movimiento de las partículas en el lecho. Este tipo de patrón de flujo se conoce como **modelo de ascenso de una columna central** o también como **modelo de dos vórtices**.

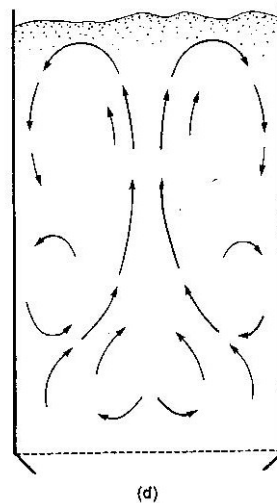


Imagen 5.3 Movimiento de la emulsión en lechos profundos. $L/W > 1$. Modelo de dos vórtices. [2] p.140.

El flujo de la emulsión refleja el patrón de ascenso de las burbujas de gas en el lecho. La región de emulsión de flujo ascendente es la más rica en burbujas, mientras que el flujo descendente de la emulsión no tiene apenas burbujas y corresponde al descenso de las partículas.

5.2 Objetivo

En este capítulo se analizan los patrones de ascenso de las burbujas en el lecho para un distribuidor plano de orificios múltiples al que se presupone una distribución uniforme del gas. Se ensayarán cuatro configuraciones distintas de disposición de los agujeros abiertos homogéneamente distribuidos a lo largo de la placa, respetando que la relación de área abierta sea lo más parecida posible en las cuatro configuraciones.

El objetivo principal es determinar si esta variación en la disposición de los agujeros, para configuraciones del distribuidor que presentan la misma pérdida de carga (mismo distribuidor y misma relación de área abierta) y para condiciones de operación iguales, provoca una variación significativa en los patrones de ascenso de las burbujas a través del lecho.

Las condiciones de operación que vamos a utilizar para comparar las cuatro configuraciones son: tres relaciones de aspecto distintas (L/W) y cuatro excesos de aire distintos (U/U_{mf}) para cada una de las relaciones de aspecto. Así, cada una de las configuraciones estará determinada para doce casos distintos.

Para el análisis comparativo se utilizarán las imágenes promedio en escala de grises que son resultado de la superposición de los distintos instantes en los que se encuentra el lecho durante la fluidización durante un tiempo determinado. Tendremos una imagen promedio para cada uno de los 48 casos analizados. Además se realizará un análisis cualitativo a través de la observación de la línea media del lecho fijo de los distintos casos a ensayar y un análisis de la altura a la que se produce el tránsito entre el modelo de dos columnas y el modelo de una columna central.

5.3 Descripción de la toma de medidas

- Configuraciones de distribuidor utilizadas: 1, 2, 3, 4.
- Alturas de lecho ensayadas para cada configuración: 30 cm ($L/W=1$), 40 cm ($L/W=1,333$), 50 cm ($L/W=1,667$).
- Exceso de aire ensayado para cada altura: $U/U_{mf}=1, 1.5, 2, 2.5$.
- Grabación de 60 segundos de imágenes a 100 imágenes por segundo para cada uno de los 48 casos.
- Luz homogénea.
- Colocación de la cámara de tal manera que el objetivo apunte perpendicularmente al centro del lecho.
- Obtención de las imágenes en formato .jpg

5.4 Procesado e interpretación de las imágenes

Cada imagen a color muestra el estado del lecho en un instante determinado. Al grabar durante 60 segundos, obtendremos en torno a 6000 imágenes que son más que suficientes para observar los patrones característicos de ascenso de las burbujas.

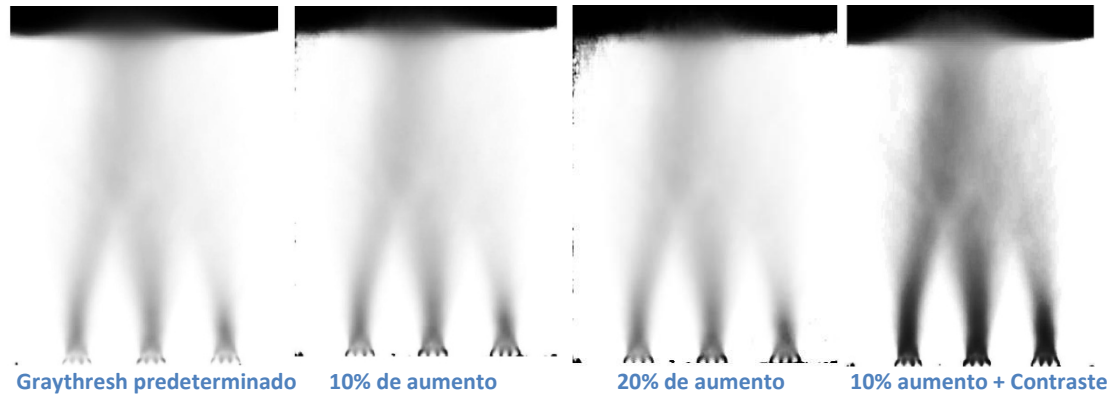
Para obtener una imagen promedio en escala de grises, debemos hacer que cada imagen captada sea recortada (para evitar la presencia de los bordes del reactor en la imagen), calcular su nivel umbral de gris y convertir la imagen a blanco y negro donde todos los píxeles con una mayor iluminación que el nivel umbral de gris se convertirán a 1 y todos los píxeles con menor iluminación se convertirán a 0. Al sumar todas las imágenes y dividir las por el número de imágenes totales, obtendremos una imagen promedio con niveles de grises entre 0 y 1. Aquellos puntos con mayor paso de burbuja serán los más oscuros, es decir, los valores más cercanos a cero y aquellos puntos donde haya menor paso de burbujas serán los valores más cercanos a 1.

Para explicarlo más concretamente nos vale el siguiente ejemplo:

Si cogemos como referencia un pixel, si en una imagen (instante) la burbuja está sobre ese pixel, su participación a la matriz suma será un 0. Si sobre el pixel se encontrasen partículas, su participación a la matriz sería un 1. Si por ese pixel pasan muchas burbujas las aportaciones a la matriz serán más ceros que unos, sumando números más bajos a la celda de la matriz suma total correspondiente al pixel. Al dividir entre el número total de imágenes para obtener una imagen promedio, las celdas de la matriz que tengan menor valor serán los más cercanos a 0 y viceversa.

Si las imágenes no se han capturado con la luz lo más homogénea posible o el nivel umbral no es el adecuado para percibir visualmente los caminos de subida de las burbujas, se puede modificar el nivel umbral. Al aumentar este nivel, más píxeles irán a 0 (se oscurecerá la imagen) y al revés ocurrirá si se disminuye el nivel umbral, más píxeles se convertirán a 1 (se aclarará la imagen). Este recurso puede paliar los posibles errores en la toma de imágenes y ayudar a una mejor interpretación de las imágenes sobre todo a velocidad de mínima fluidización donde al existir una presencia de burbujas pequeñas y que ascienden a poca velocidad, es más difícil que los caminos de subida se perciban visualmente sin cambiar los niveles de umbral. A velocidades de fluidización mayores que la velocidad de mínima fluidización, no es necesario aplicar ningún tipo de variación en el nivel de umbral ya que se perciben claramente los caminos de subida.

En este trabajo, además, para las imágenes obtenidas a velocidad de mínima fluidización se ha aumentado el contraste entre blancos y negros mediante un programa de retocado de imágenes para observar mejor cualitativamente los caminos de subida de las burbujas. Un ejemplo del aumento del nivel umbral y posterior aumento del nivel de contraste es la siguiente secuencia de imágenes recogidas para la configuración 4 $L/W=1$ $U/U_{mf}=1$:



La implementación del proceso de obtención de la imagen promedio se ha realizado en MATLAB, debido a sus potentes recursos para el tratamiento de imágenes. El código utilizado está disponible en el ANEXO II del trabajo. A continuación, se muestra un diagrama de flujo representativo del proceso que realizamos para la obtención de nuestras imágenes promedio:

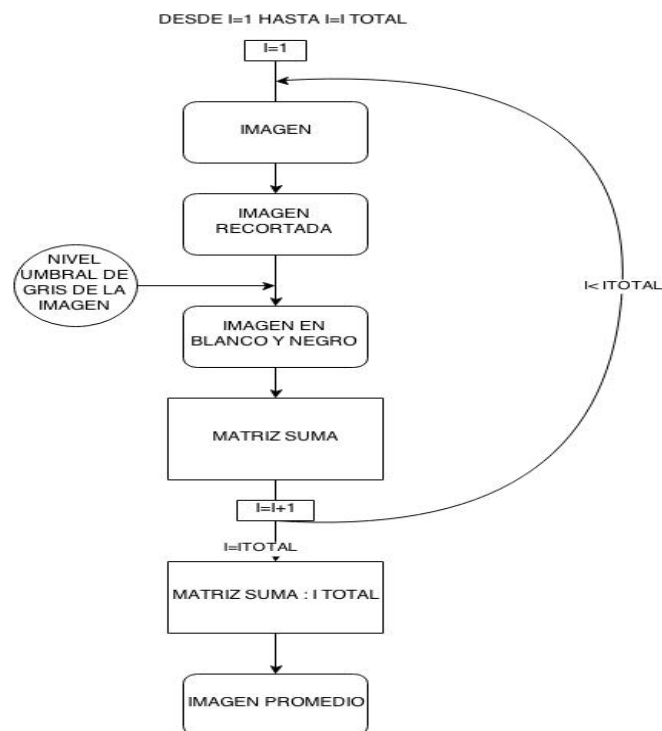


Imagen 5.5 Diagrama de flujo correspondiente al proceso a seguir para la obtención de la imagen promedio.

Con todo lo explicado anteriormente, a la hora de observar una imagen promedio, zonas que se encuentren más oscuras representarán a aquellas por las que las burbujas pasan con mayor frecuencia correspondientes a los flujos ascendentes. Zonas más claras, representarán a aquellas en las que la mayor presencia es de partículas y por donde las burbujas no realizan su ascenso a través del lecho.

5.5 Procesado e interpretación de los niveles de gris a distintas alturas de lecho.

Como hemos visto anteriormente, cada una de las imágenes promedio es una matriz en la que cada celda corresponde a un pixel de la imagen. Al realizar la grabación con la cámara tumbada, es decir, como si las imágenes anteriores (Ver la posición de las imágenes de la secuencia de la página anterior) las volteásemos 90 grados en sentido antihorario, la celda 1x1 de la matriz corresponde a la esquina superior derecha de las imágenes. Por tanto, el ancho del lecho, W , corresponderá al número total de filas que tiene la matriz.

Conociendo esta relación entre el ancho del lecho y el número de filas de la matriz, podemos conocer cualquier posición real de un punto de nuestra imagen a través de su posición en la matriz realizando una simple regla de tres.

Para obtener la altura a la que se produce el tránsito entre el modelo de ascenso de dos columnas y el modelo de ascenso de una columna central, si es que existe este paso, se grafican líneas horizontales de la imagen promedio correspondientes a distintas alturas del lecho. Las líneas horizontales de la imagen (correspondientes a las columnas de la matriz) se enfrentarán en la gráfica al ancho del lecho de tal manera que obtendremos la variación de los valores en escala de grises que sufre una altura concreta del lecho. Realizando este proceso para distintas alturas y observando el cambio entre la forma de las curvas al estar dentro de la región correspondiente al modelo de dos columnas y la región correspondiente al modelo de una columna central, se obtendrá la altura correspondiente de tránsito.

Se realiza este proceso para cada una de las configuraciones del distribuidor ensayada con sus tres alturas y tres excesos de aire distintos ($U/U_{mf}=1,5$; $U/U_{mf}=2$; $U/U_{mf}=2,5$). Para los lechos de relación de aspecto $L/W=1$, se grafican diez alturas distintas desde los 2,5 cm hasta los 25 cm con un aumento proporcional de 2,5 cm. Para los lechos de altura $L/W=1,33$ y $L/W=1,667$ se dibujan doce alturas distintas desde 2,5 cm hasta 30 cm con un aumento proporcional de 2,5 cm. Este rango de recogida es más que suficiente para poder obtener el paso de un modelo a otro. La altura cero es la base del lecho.

Tanto el código de implementación de este proceso como las imágenes resultantes con esta información estarán disponibles en el anexo II y III respectivamente. En el apartado de resultados se dispondrá de una tabla resumen con las alturas correspondientes a cada caso analizado.

Se comparará, además, en una misma gráfica, las distintas configuraciones de distribuidor a través de la línea horizontal de la imagen promedio correspondiente a la altura media del lecho fijo. Se compararán las distintas configuraciones para cada una de las relaciones de aspecto y los distintos excesos de aire mayores que uno.

Este análisis trata de comparar la forma en la que los puntos se grafican con respecto al ancho del distribuidor. Las distintas formas de las curvas indican por dónde suben preferiblemente las burbujas.

A continuación se realiza una explicación para la interpretación de las líneas y su variación en la escala de grises según en la región del lecho en la que se encuentre.

Una línea horizontal de la imagen correspondiente a una altura del lecho en escala de grises que represente que el lecho se encuentra bajo condiciones del modelo de ascenso de dos columnas será como la siguiente figura indica:

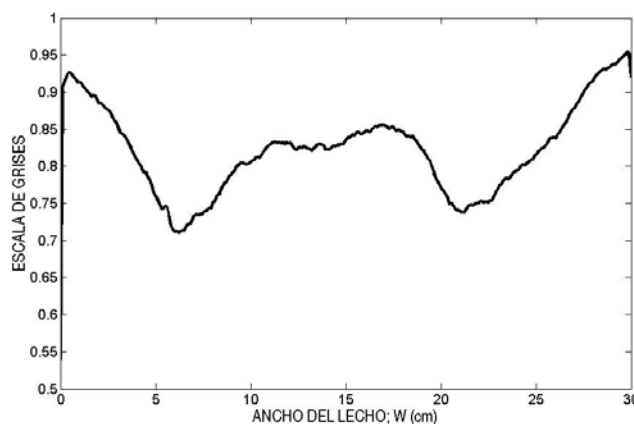


Imagen 5.6. Variación en la escala de grises a una altura determinada frente al ancho del distribuidor. Modelo de dos columnas.

La zona central con valores más cercanos a uno es debido a una mayor presencia de partículas que descienden por el centro del lecho. Los dos flujos de burbujas ascienden por los laterales y quedan representados en la imagen por las dos curvas de mínimos con valores más cercanos a cero que indican una mayor presencia de burbujas en esas posiciones.

Una línea horizontal de la imagen correspondiente a una altura del lecho en escala de grises que represente que el lecho se encuentra bajo condiciones del modelo de ascenso de una columna central será como la siguiente figura indica:

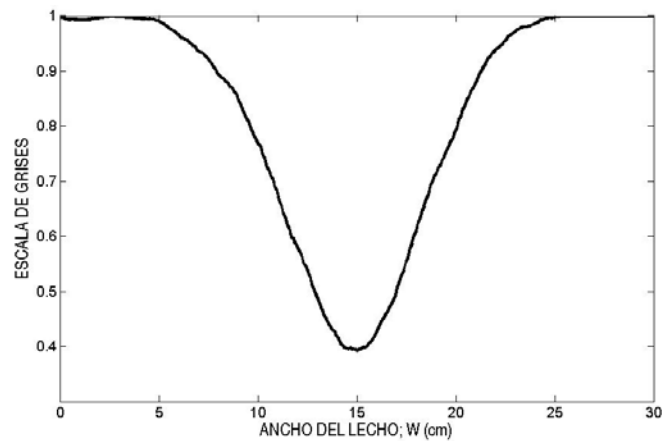


Imagen 5.7. Variación en niveles de grises a una altura determinada frente al ancho del distribuidor. Modelo de una columna central.

El ascenso principal de burbujas ocurre por el centro del lecho, por ello los valores son más cercanos a cero. Los dos vórtices de movimiento de partículas quedan a los laterales del flujo central y están representados por valores más cercanos a uno en la escala de grises.

5.6 Velocidad de mínima fluidización: Consideraciones

Como hemos visto en el capítulo 4 del proyecto, los valores de la velocidad de mínima fluidización pueden sufrir una variación provocada por una variación en las características de las partículas, en las condiciones de operación ambientales definidas, en el método de cálculo empleado etc. Lo que nos hace comprender el grado de incertidumbre con el que hay que convivir a la hora de enfrentarse a este parámetro tan importante dentro de la ingeniería de la fluidización.

Durante la toma de datos de presión para la obtención posterior de la velocidad de mínima fluidización se percibía que la fluidización completa del lecho para todas las configuraciones y alturas comenzaba en torno a 0,33 y 0,355 m/s (valores correspondientes a los caudales de 30 y 32 L/min) Muchos de los valores de mínima fluidización calculados se encuentran por debajo de este valor.

Es posible que, como observó Sánchez-Delgado S. [5], en lechos bidimensionales con distribuidores de alta pérdida de carga (como es el nuestro), las burbujas comienzan a coalescer en el centro del lecho dejando los lados completamente libre de burbujas, dando lugar a una mayor porosidad en el centro del lecho que en las zonas más cercanas a las paredes cuando estamos en condiciones de mínima fluidización. La distribución de la fracción de vacío no es, por lo tanto, uniforme en todo el lecho y por lo tanto, las burbujas tienden a aparecer por el centro del lecho, donde las partículas son menos compactas.

Como podemos observar en la siguiente figura, las burbujas comienzan a aparecer en la parte central superior del lecho, 5.8(a), donde la porosidad es mayor. Si se incrementa la velocidad comienzan a aumentar su presencia, 5.8(b), si se sigue incrementando, las burbujas aparecerán para toda la altura del lecho pero únicamente en la zona central, 5.8(c). Si se sigue aumentando la velocidad, las burbujas comenzarán a aparecer distribuidas por todo el ancho del lecho.

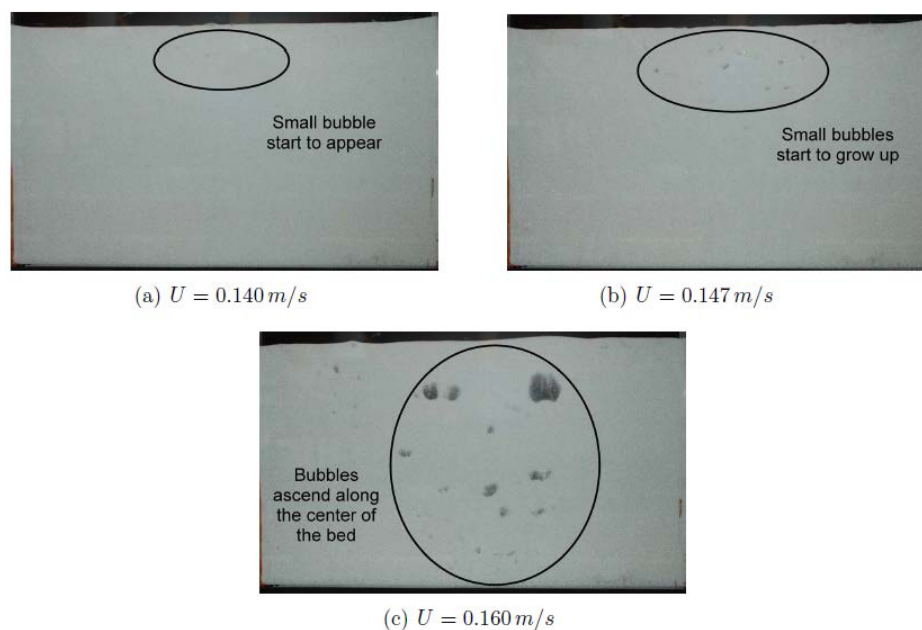


Imagen 5.8. Comienzo de la presencia de burbujas en el lecho a velocidades cercanas a la velocidad de mínima fluidización. Sánchez-Delgado S. [5].

La velocidad de mínima fluidización calculada para este caso por Sánchez-Delgado S. [5] es de 0,1392 m/s. Como observamos en la secuencia de imágenes aún la fluidización no se ha producido completamente para esa velocidad. Al sufrir una fluidización parcial del lecho, los sensores de presión pueden recoger la información del movimiento de las burbujas y dar, por lo tanto, unos valores de velocidad de mínima fluidización menores que a los que realmente el lecho presenta una fluidización lo más homogénea posible.

Por todo ello, para asegurar una fluidización lo más homogénea posible con la que poder percibir los caminos preferenciales de subida de burbujas a velocidades, si no de mínima fluidización, a valores cercanos que estén dentro de un rango admisible con respecto a los resultados obtenidos en el capítulo 4, además de consecuentes con la explicación mostrada, se decide coger como valor de mínima fluidización para todas las configuraciones del distribuidor y todas las alturas $U_{mf}=0,355 \text{ m/s}$ (32L/min). Todas las relaciones de exceso de aire U/U_{mf} irán acorde a este valor de velocidad.

Esta consideración se tiene en cuenta para el cálculo de los excesos de aire tanto del capítulo 5 como del capítulo 6.

5.7 RESULTADOS

A continuación, se muestran las imágenes obtenidas, ordenadas por la altura del lecho fijo. En cada fila, se encuentran las cuatro configuraciones del distribuidor para cada uno de los excesos de aire estudiados.

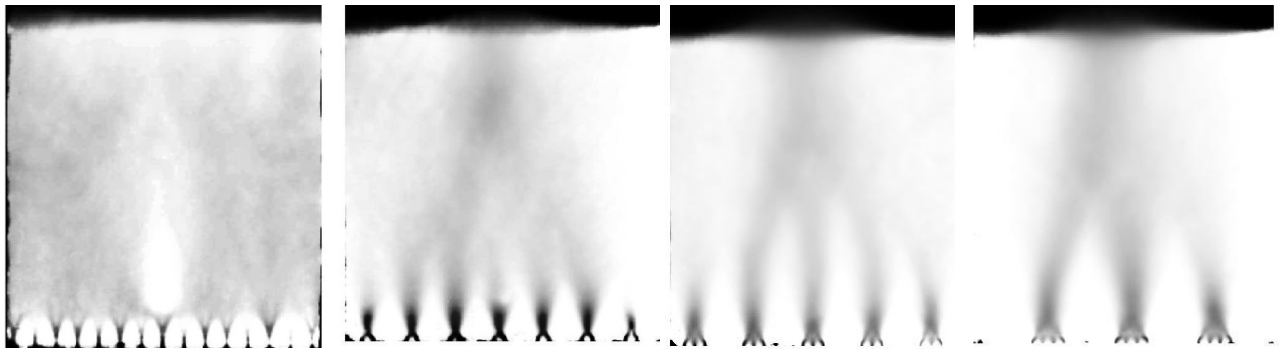
Primero compararemos las imágenes correspondientes a la velocidad de mínima fluidización para cada altura de lecho.

Tanto con las imágenes obtenidas como con la tabla resumen y las gráficas del Anexo III, compararemos las semejanzas y diferencias de la zona de tránsito para las distintas configuraciones del distribuidor.

Después se realizará la comparación de las líneas correspondientes a las alturas medias del lecho.

La nomenclatura utilizada en las imágenes es la siguiente:

- D = Configuración
- H30 = L/W=1
- H40=L/W=1,333
- H50=L/W=1,667

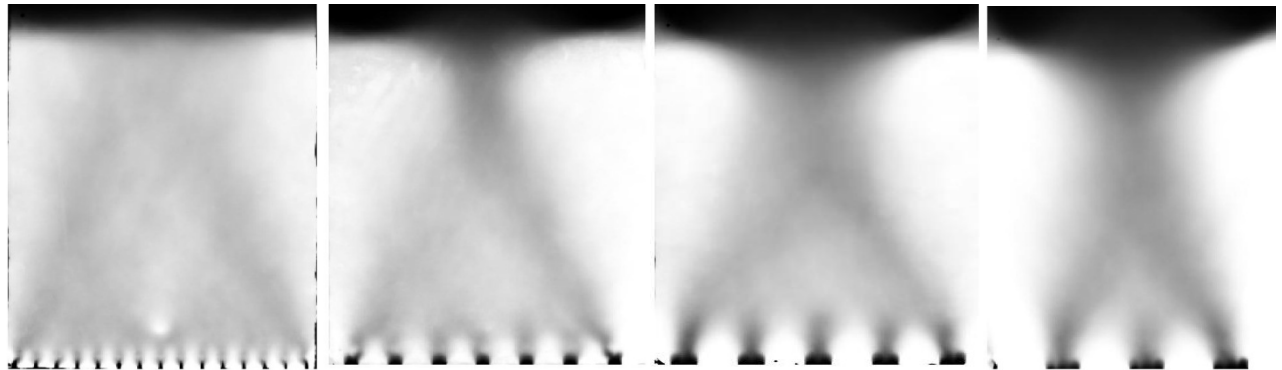


D1. H30. $U/U_{mf}=1$

D2. H30. $U/U_{mf}=1$

D3. H30. $U/U_{mf}=1$

D4. H30. $U/U_{mf}=1$

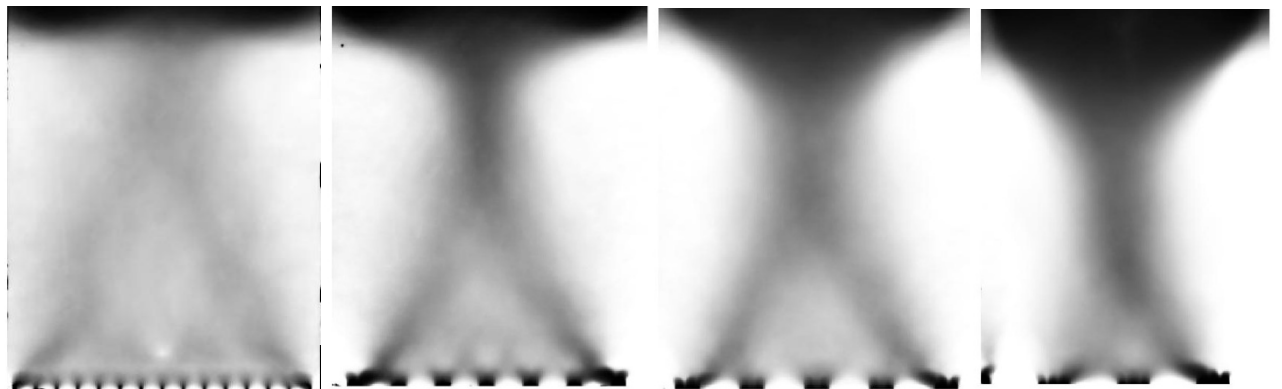


D1. H30. $U/U_{mf}=1,5$

D2. H30. $U/U_{mf}=1,5$

D3. H30. $U/U_{mf}=1,5$

D4. H30. $U/U_{mf}=1,5$

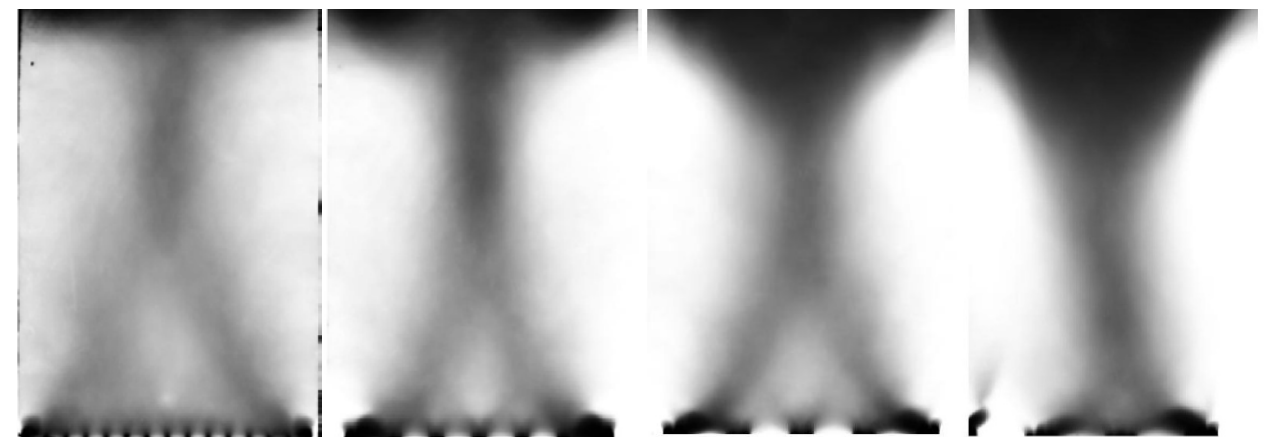


D1. H30. $U/U_{mf}=2$

D2. H30. $U/U_{mf}=2$

D3. H30. $U/U_{mf}=2$

D4. H30. $U/U_{mf}=2$

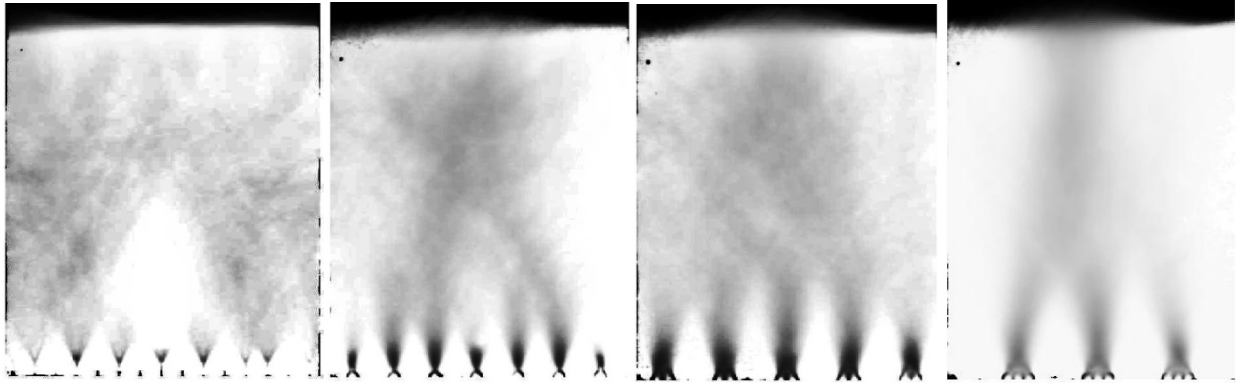


D1. H30. $U/U_{mf}=2,5$

D2. H30. $U/U_{mf}=2,5$

D3. H30. $U/U_{mf}=2,5$

D4. H30. $U/U_{mf}=2,5$

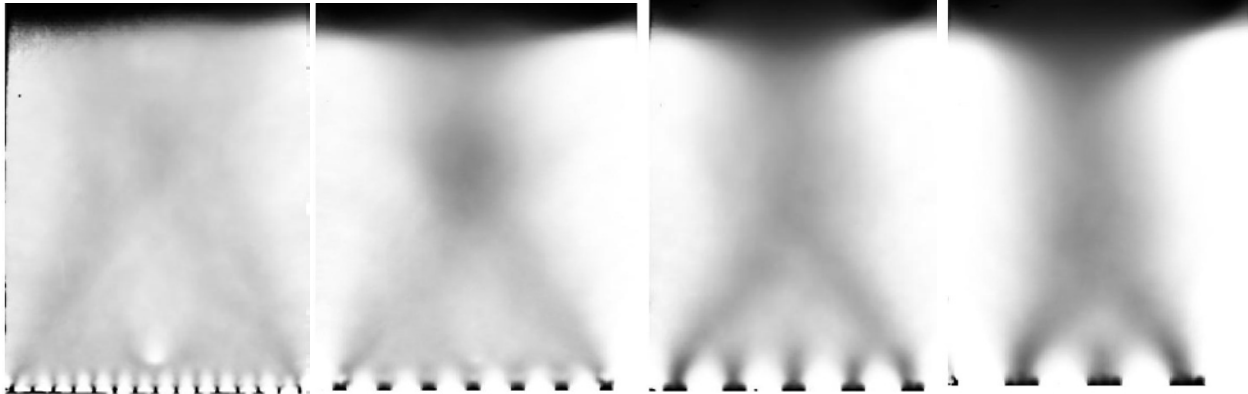


D1. H40. $U/U_{mf}=1$

D2. H40. $U/U_{mf}=1$

D3. H40. $U/U_{mf}=1$

D4. H40. $U/U_{mf}=1$

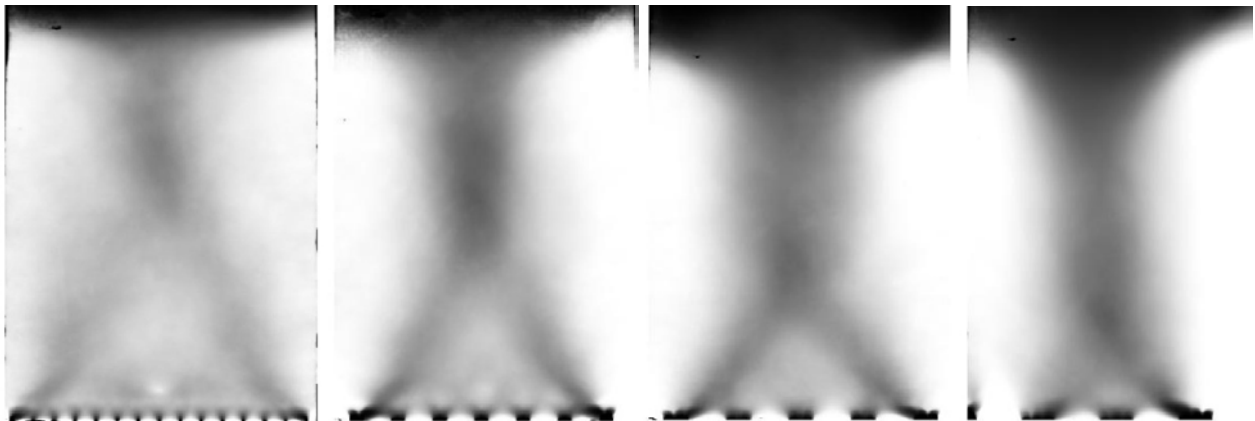


D1. H40. $U/U_{mf}=1,5$

D2. H40. $U/U_{mf}=1,5$

D3. H40. $U/U_{mf}=1,5$

D4. H40. $U/U_{mf}=1,5$

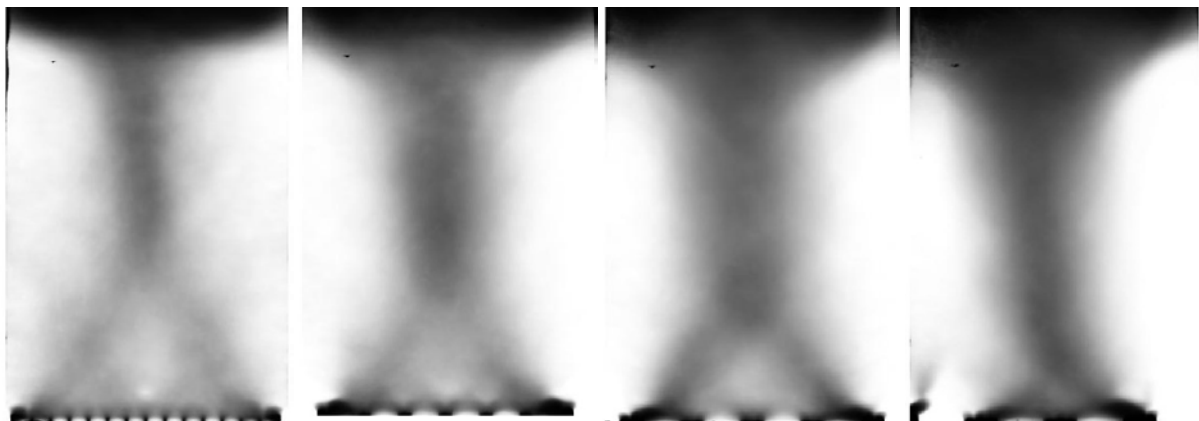


D1. H40. $U/U_{mf}=2$

D2. H40. $U/U_{mf}=2$

D3. H40. $U/U_{mf}=2$

D4. H40. $U/U_{mf}=2$

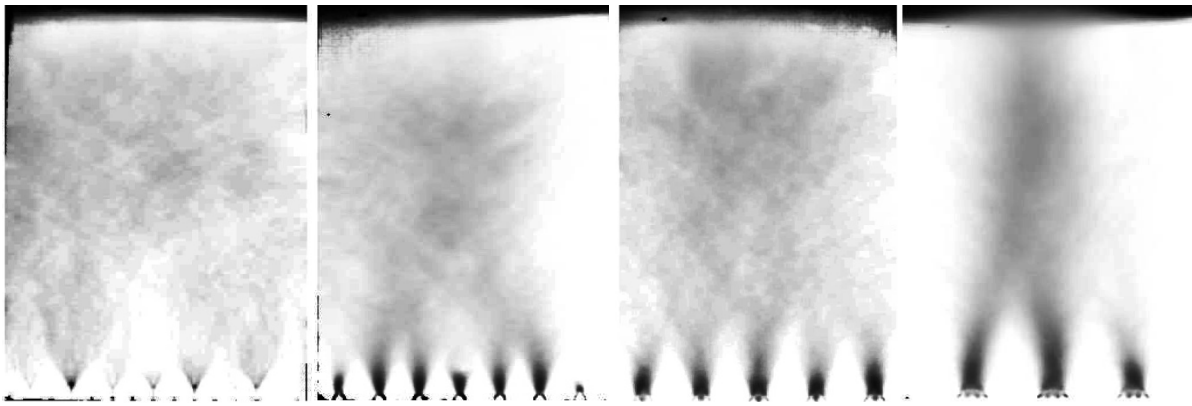


D1. H40. $U/U_{mf}=2,5$

D2. H40. $U/U_{mf}=2,5$

D3. H40. $U/U_{mf}=2,5$

D4. H40. $U/U_{mf}=2,5$

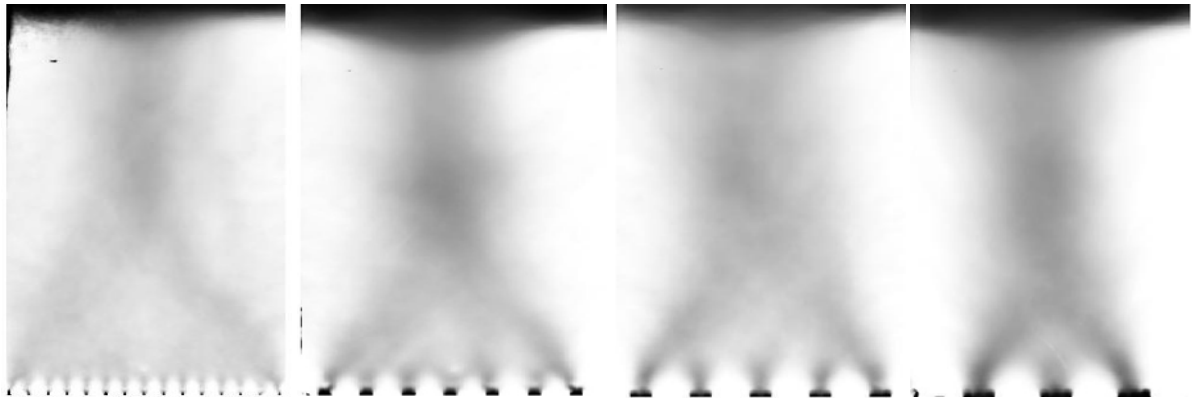


D1. H50. $U/U_{mf}=1$

D2. H50. $U/U_{mf}=1$

D3. H50. $U/U_{mf}=1$

D4. H50. $U/U_{mf}=1$

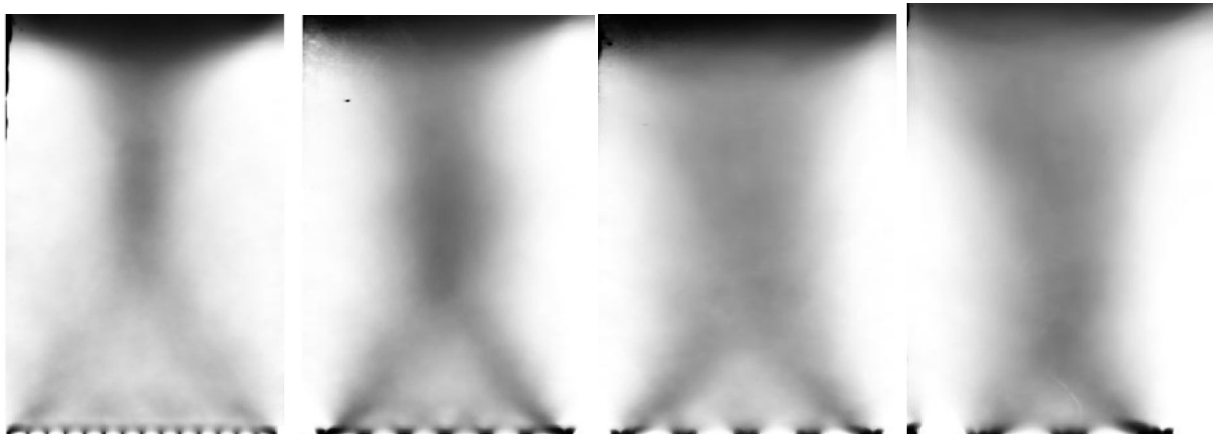


D1. H50. $U/U_{mf}=1,5$

D2. H50. $U/U_{mf}=1,5$

D3. H50. $U/U_{mf}=1,5$

D4. H50. $U/U_{mf}=1,5$

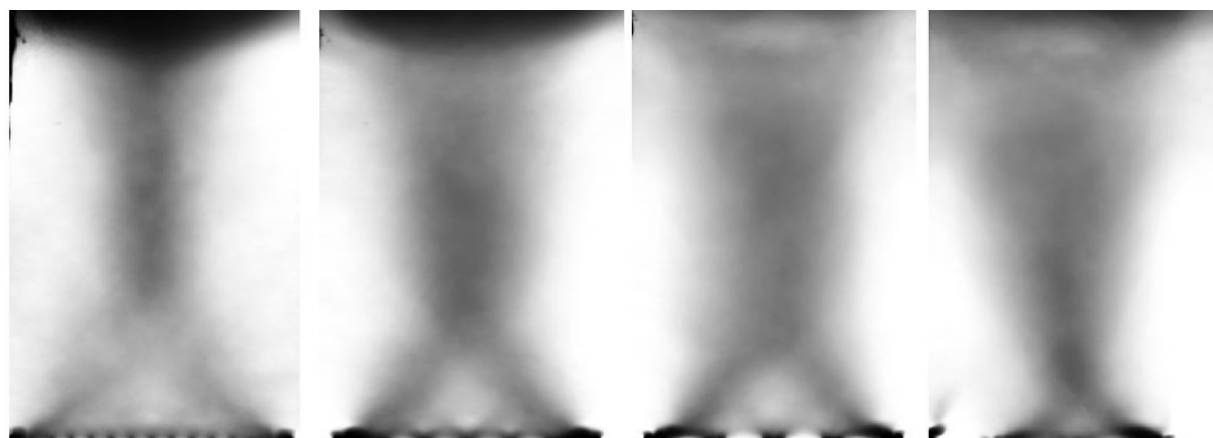


D1. H50. $U/U_{mf}=2$

D2. H50. $U/U_{mf}=2$

D3. H50. $U/U_{mf}=2$

D4. H50. $U/U_{mf}=2$



D1. H50. $U/U_{mf}=2,5$

D2. H50. $U/U_{mf}=2,5$

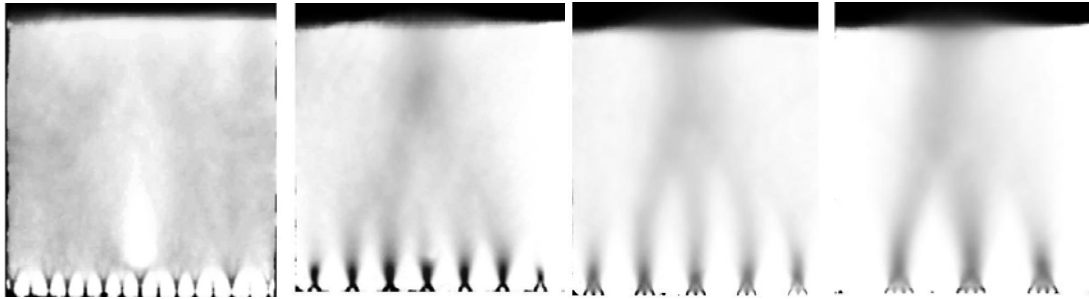
D3. H50. $U/U_{mf}=2,5$

D4. H50. $U/U_{mf}=2,5$

MÍNIMA FLUIDIZACIÓN

Si analizamos las imágenes correspondientes a los estados de mínima fluidización, observamos que no existe una diferencia cualitativa significativa en relación al ascenso de las burbujas entre lechos con radios de aspecto distintos para un mismo tipo de configuración del distribuidor. Así, las conclusiones obtenidas a la hora de comparar distintas configuraciones del distribuidor para una altura de lecho serán semejantes para las otras dos alturas de lecho analizadas.

Si analizamos las imágenes correspondientes a $L/W=1$ $U/U_{mf}=1$, observamos como en los estados de mínima fluidización aparecen los jets o chorros de salida del aire a través de los agujeros.



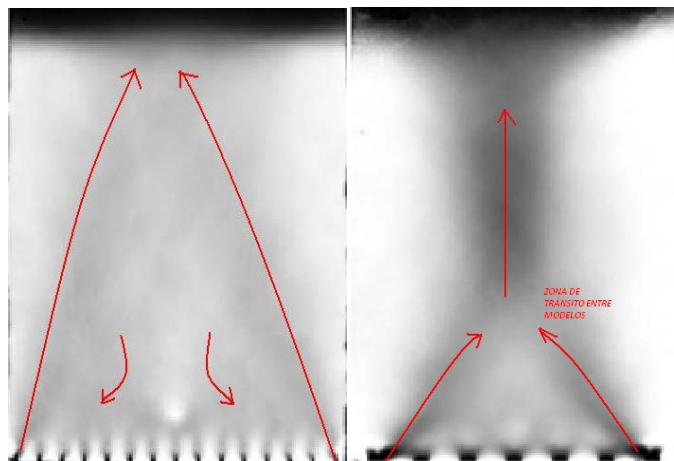
Estos jets, para ternas de agujeros abiertos mayores que uno (Configuración 2, Configuración 3, Configuración 4) acaban juntándose con el chorro del o de los agujeros que tiene al lado formando canales mayores de ascenso. Estos canales por donde comienza a ascender el aire, o las burbujas si ya hemos pasado la zona de activación, acaban juntándose con el resto a distintas alturas según la configuración del distribuidor. Según aumenta la terna de agujeros abiertos juntos, es decir, pasamos de la configuración 1 a la configuración 4, los canales de ascenso se juntan a una altura mayor de lecho.

También observamos como el patrón de ascenso tiende a ser un camino situado en el centro del lecho cada vez más estrecho según pasamos de la configuración 1 a la configuración 4.

EXCESOS DE AIRE: $U/U_{mf}=1,5$; $U/U_{mf}=2$; $U/U_{mf}=2,5$

En la introducción a los patrones de ascenso de las burbujas y las partículas en el lecho, hemos hablado del modelo de dos columnas y del modelo de una columna central. Según la teoría lechos de radio de aspecto (L/W) igual a 1 presentaban un comportamiento semejante al modelo de dos columnas. En cambio lechos de radio de aspecto (L/W)>1 presentaban un comportamiento semejante al modelo de una columna central y con mayor presencia de este segundo modelo cuanto mayor era el exceso de aire.

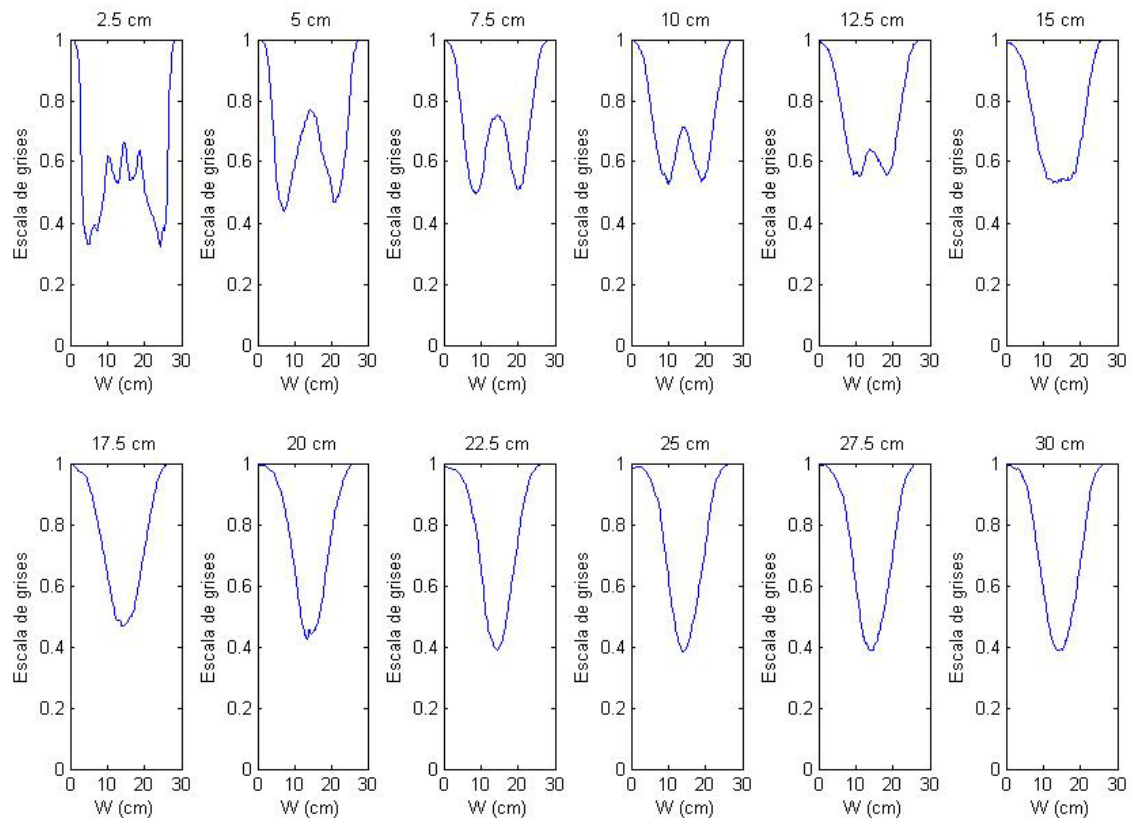
Realizando un análisis de las imágenes, en contraposición con la teoría en lo referente a lechos de relación de aspecto igual a 1, observamos cómo en la mayoría de casos analizados el modelo preferente es el de una columna. Sólo un caso presenta un comportamiento similar al de dos columnas y es el correspondiente a la Configuración 1, $L/W=1$, $U/U_{mf}=1,5$.



Ejemplo del modelo de dos columnas. Ejemplo del modelo de una columna.

Para relaciones de aspecto mayores que uno, observamos cómo todos los casos presentan un comportamiento similar al modelo de una columna central.

A continuación, se estudia la altura a la que se produce el tránsito entre ambos modelos. Los datos de la tabla se han obtenido como se ha indicado en la descripción del punto 5.5, las gráficas correspondientes se encuentran en el ANEXO III.



Niveles de gris a distintas alturas de lecho. Configuración 2, $L/W=1,667$, $U/U_{mf}=2$.

Esta imagen representa la variación de los valores en escala de grises con respecto al ancho del lecho a distintas alturas del lecho. Hasta una altura de 12,5 cm se percibe la curva característica que representa al modelo de dos columnas. Vemos como cada vez la zona central de partículas se va haciendo más pequeña conforme nos acercamos a la altura de tránsito. A una altura de 15 cm el modelo de dos columnas ya ha desaparecido y tenemos una curva característica que representa al modelo de una columna central. A partir de la altura de 15 cm, vemos como cada vez se va haciendo más pronunciada la presencia de burbujas en el centro del lecho (Valores más cercanos a 0 en la escala de grises). Por todo ello, podemos decir que la zona de tránsito se encontrará entre la altura 12,5 cm y la altura 15 cm.

Este mismo procedimiento se ha realizado para los 36 casos analizados según las condiciones de operación. En la siguiente página se adjunta la tabla resumen con las alturas correspondientes.

TABLA 5.1 ALTURAS A LAS QUE SE PRODUCE EL TRÁNSITO ENTRE EL MODELO DE ASCENSO DE DOS COLUMNAS Y EL MODELO DE ASCENSO DE UNA COLUMNA CENTRAL PARA CADA CONFIGURACIÓN DE DISTRIBUIDOR SEGÚN LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN ANALIZADAS:

ALTURA DE LECHO; RADIO DE ASPECTO (L/W)	L/W=1			L/W=1,33			L/W=1,667		
EXCESO DE AIRE; U/U_{mf}	1,5	2	2,5	1,5	2	2,5	1,5	2	2,5
CONFIGURACIÓN 1	[-]	[22,5-25]	[17,5-20]	[22,5-25]	[20-22,5]	[17,5-20]	[20-22,5]	[17,5-20]	[12,5-15]
CONFIGURACIÓN 2	[17,5-20]	[15-17,5]	[12,5-15]	[17,5-20]	[15-17,5]	[10-12,5]	[15-17,5]	[15-17,5]	[12,5-15]
CONFIGURACIÓN 3	[15-17,5]	[12,5-15]	[10-12,5]	[17,5-20]	[12,5-15]	[10-12,5]	[15-17,5]	[12,5-15]	[10-12,5]
CONFIGURACIÓN 4	[12,5-15]	[5-7,5]	[5-7,5]	[10-12,5]	[5-7,5]	[5-7,5]	[12,5-15]	[5-7,5]	[2,5-5]

Intervalos de altura (cm) respecto a la superficie inferior del lecho que indican la posición del tránsito de un modelo a otro.

Observando la tabla podemos interpretar lo siguiente:

Para distintas configuraciones del distribuidor, manteniendo las mismas condiciones de operación (relación de aspecto y excesos de aire) la altura a la que se produce el tránsito varía. De tal modo que, según las configuraciones del distribuidor aumentan el número de agujeros abiertos en cada terna (De la configuración 1 a la configuración 4) el tránsito se produce a una menor altura. Por tanto, el modelo de ascenso de una columna central es más predominante según pasamos de la configuración 1 a la configuración 4.

Las diferencias son muy significativas entre la configuración 1 y la configuración 4 para todas las relaciones de aspecto y excesos de aire.

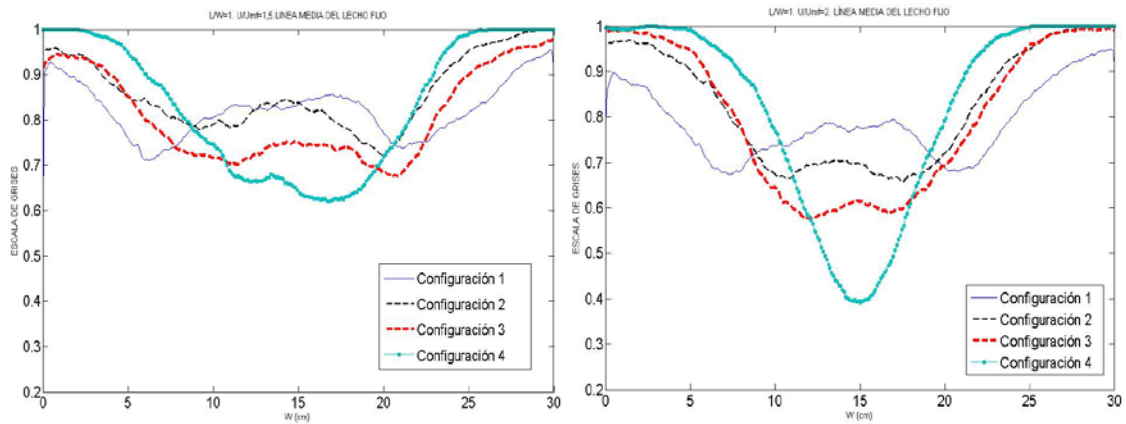
Las configuraciones 2 y 3 presentan una mayor similitud entre sí para relaciones de aspecto de 1,33 y 1,667 y para algunos excesos de aire en los que la altura de tránsito se encuentra en el mismo rango. Aun así, existen diferencias claras para relaciones de aspecto igual a 1, comenzando el modelo de una columna central antes en la configuración 3 que en la configuración 2.

Para una misma configuración del distribuidor, manteniendo la relación de aspecto y variando los excesos de aire, podemos observar que según aumenta el exceso de aire la altura a la que se produce el tránsito entre los modelos disminuye. Esto ocurre para las cuatro configuraciones y las tres relaciones de aspecto estudiadas, salvo en algún caso concreto en el que el rango se mantenga al pasar del exceso de aire $U/U_{mf}=2$ a $U/U_{mf}=2,5$.

A continuación, se comparan en una misma gráfica los niveles de grises correspondientes a las alturas medias del lecho fijo de cada una de las configuraciones del distribuidor para cada uno de los excesos de aire estudiados. Se trata de observar cómo se comporta cada configuración cuando llega a la mitad de la altura del lecho en relación a los niveles de grises (teniendo en cuenta las posibles diferencias que se producen por la no homogeneidad de la luz, del nivel umbral etc.) y a la forma de las curvas.

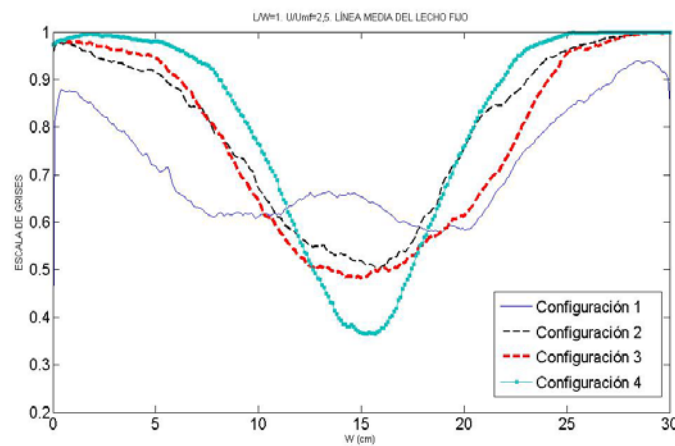
Aunque esto se puede percibir ya según el análisis anterior de la zona de tránsito, puede ser de interés comparar las distintas configuraciones cuando la línea media del lecho está por encima de las zonas de tránsito de las configuraciones. Así, comprobamos si al pasar la altura de tránsito las distintas configuraciones se comportan igual en lo referente al ascenso de burbujas por el centro del lecho.

COMPARACIÓN DE LA ALTURA MEDIA DEL LECHO FIJO: $L/W=1$



$L/W=1$. $U/U_{mf}=1,5$. Línea media del lecho fijo (15 cm).

$L/W=1$. $U/U_{mf}=2$. Línea media del lecho fijo (15 cm).



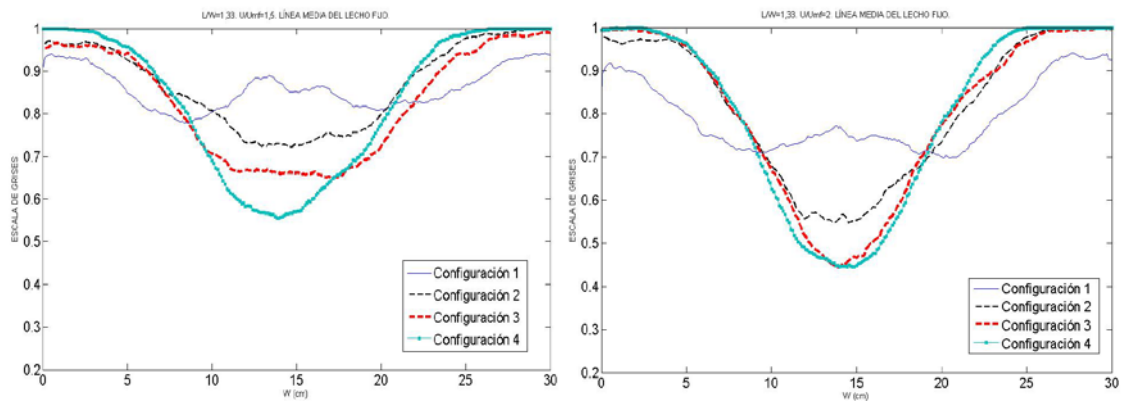
$L/W=1$. $U/U_{mf}=2,5$. Línea media del lecho fijo (15 cm).

La configuración 1 a la altura media del lecho para $L/W=1$ presenta la curva característica del modelo de dos columnas para los tres exceso de aire analizados. Las configuraciones 2 y 3 para el exceso de aire $U/U_{mf}=1,5$ también presentan este tipo de curva. Como podemos ver, para este exceso de aire son muy parecidas las curvas en su forma y valores. Valores cercanos, también, a los que presenta la configuración 4 que acaba de pasar al modelo de una columna a esta altura.

Para $U/U_{mf}=2$ la línea media de la configuración 2 se encuentra en la zona de tránsito (15-17,5cm) y la de la configuración 3 se encuentra justo por encima (12,5-15 cm) y presentan unos valores y forma similares entre sí pero distintos al de la configuración 4 que al encontrarse a 8 cm de la zona de tránsito (5-7,5 cm) la forma de la curva es más cerrada y con un mínimo más pronunciado en el centro geométrico del lecho, propio del ascenso pronunciado por la parte central de las burbujas.

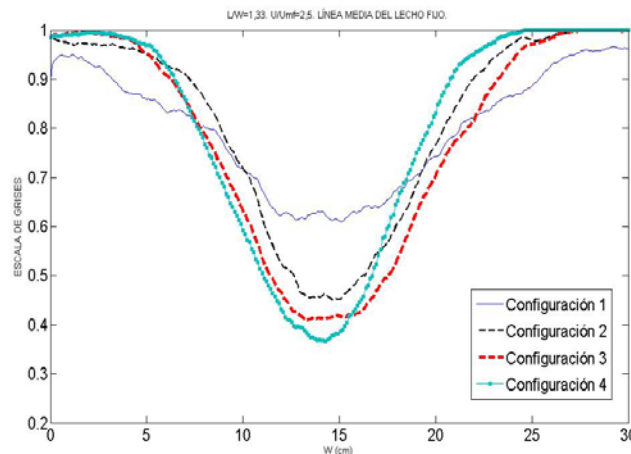
Para $U/U_{mf}=2,5$ las líneas de las configuraciones 2 y 3 se encuentran a 1,75 y 3,25 cm respectivamente de la zona de tránsito y presentan una curva similar entre sí. La configuración 4 se encuentra a 8 cm y al igual que para $U/U_{mf}=2$ la curva es aún más pronunciada.

COMPARACIÓN DE LA ALTURA MEDIA DEL LECHO FIJO: $L/W=1,33$



$L/W=1,33$. $U/U_{mf}=1,5$. Línea media del lecho fijo (20 cm).

$L/W=1,33$. $U/U_{mf}=2$. Línea media del lecho fijo (20 cm).



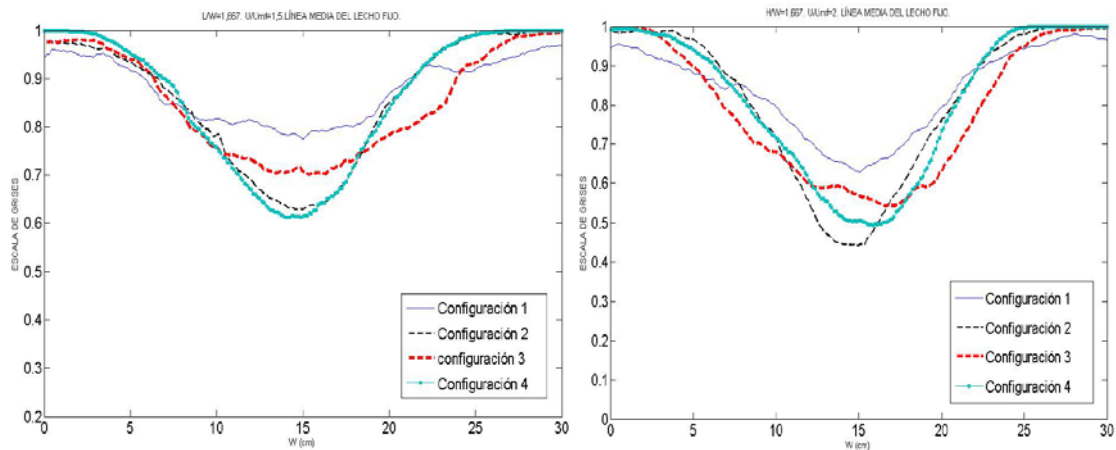
$L/W=1,33$. $U/U_{mf}=2,5$. Línea media del lecho fijo (20 cm).

Lo más significativo es ver que para $U/U_{mf}=2$, la línea de la configuración 2 se encuentra aproximadamente a 3,5 cm por encima de la zona de tránsito y difiere en su forma del mínimo de las líneas de las configuraciones 3 y 4 que ya se encuentran a 6,25 cm y 13,75 cm respectivamente.

Para $U/U_{mf}=2,5$, sin embargo, la línea media de las configuraciones 2, 3 y 4 se encuentran a 8,75 cm, 8,75 cm y 13,75 cm respectivamente por encima de la zona de tránsito y presentan una curva similar con sus mínimos muy pronunciados. Esto puede indicar que a partir de cierta altura con respecto a la zona de tránsito las formas de las curvas no van a variar mucho entre las distintas configuraciones y que, por tanto, las

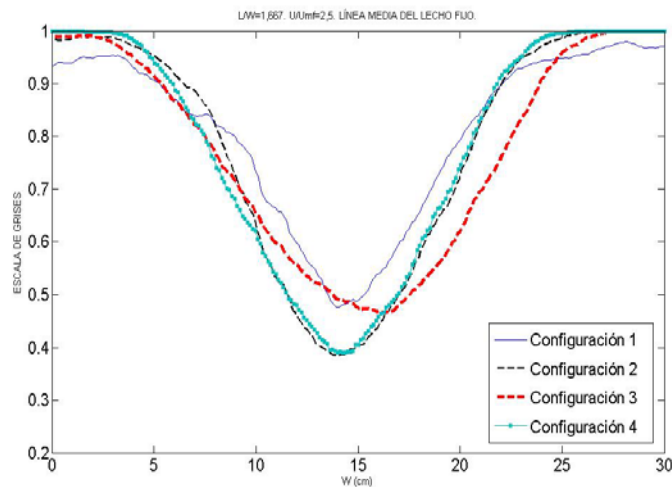
burbujas seguirán ese mismo camino preferencial por el centro del lecho. Además este camino coincide que es más pronunciado al estar en excesos de aire mayores.

COMPARACIÓN DE LA ALTURA MEDIA DEL LECHO FIJO: $L/W=1,667$



$L/W=1,667$. $U/U_{mf}=1,5$. Línea media del lecho fijo (25cm).

$L/W=1,667$. $U/U_{mf}=2$. Línea media del lecho fijo (25 cm).



$L/W=1,667$. $U/U_{mf}=2,5$. Línea media del lecho fijo (25 cm).

Las formas de las curvas de las líneas medias de las configuraciones 2,3 y 4 son muy similares entre sí para cada exceso de aire. Todas se comportan de manera similar estando a una altura mayor que la altura de su zona de tránsito. Siendo aún curvas con mínimos más pronunciados cuanto mayor es el exceso de aire. Esto ocurre en las tres relaciones de aspecto. Además, la línea media de la configuración 1, que también está por encima de sus zonas de tránsito, presenta una forma de la curva similar pero menos pronunciada en sus valores.

Como vemos con este análisis comparativo de la altura media del lecho fijo para todas las relaciones de aspecto, podemos observar que si la línea media del lecho se encuentra a una altura superior a la altura de la zona de tránsito, las curvas de las distintas configuraciones presentan aproximadamente las mismas características, ascendiendo las burbujas preferentemente por el centro del lecho y, además, el ascenso se hace aún más pronunciado por el centro geométrico del lecho a excesos de aire cada vez mayores.

Por tanto, podemos decir que las distintas configuraciones del distribuidor no afectan a nuestro patrón de ascenso de burbujas cuando nos encontramos a alturas por encima de la zona de tránsito ya que el camino preferencial de ascenso se encuentra centrado en el lecho para todos los casos.

6. FRECUENCIA CARACTERÍSTICA DEL LECHO FLUIDIZADO:

6.1 Introducción. Procesado.

Las fluctuaciones de presión son uno de los parámetros medidos con más frecuencia en el estudio de lechos fluidizados ya que proporcionan información acerca de lo que está ocurriendo dentro de la columna del lecho.

Se puede obtener una descripción cuantitativa de los regímenes de flujo a partir del análisis de series de tiempo de las señales de presión medidas. Podemos conocer la frecuencia o el intervalo de tiempo en el que un suceso predominantemente está ocurriendo de manera repetida dentro del lecho. Eso se conoce como frecuencia característica del lecho.

Aunque en este trabajo el objetivo es sacar un valor de frecuencia característica que indique el comportamiento general del lecho, existen estudios sobre el análisis de frecuencia que determinan distintas características de sucesos que están ocurriendo en el lecho durante la fluidización. Hiroyuki Kage et al [6] determinan tres tipos de sucesos que ocurren a frecuencias distintas. La frecuencia más predominante, F_g , se aproxima a la frecuencia de generación de las burbujas cerca del distribuidor. La frecuencia, F_e , corresponde a la erupción de las burbujas cerca de la superficie superior del lecho. La frecuencia F_b , corresponde a la frecuencia natural de oscilación de los lechos fluidizados.

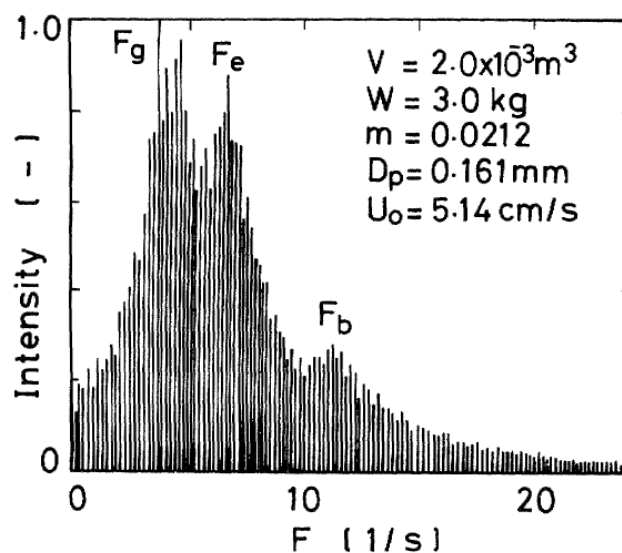


Imagen 6.1 Ejemplo típico de la función de densidad de potencia espectral. Hiroyuki et al. [6].

Según Johnsson et al. [7], El análisis de las series de tiempo se puede realizar en el dominio del tiempo, de la frecuencia (análisis espectral) o en el dominio de espacio de estados (análisis de caos).

Las mediciones pueden realizarse tanto mediante un método diferencial (diferencia de presión entre dos puntos) como mediante el método absoluto (medición en un punto de la columna del lecho). Como las ondas de presión viajan a lo largo del lecho en ambas direcciones es posible también realizar las mediciones en el plenum, C. Alberto et al. [8]. En este trabajo se han utilizados las fluctuaciones de presión medidas en la Altura 1 de la columna del lecho.

La mayoría de análisis en el dominio de la frecuencia se han realizado aplicando las series de Fourier a través de la transformada rápida de Fourier (FFT) o a través del análisis de la densidad de la potencia espectral (PSD).

En nuestro caso, la FFT implementada directamente con MATLAB presentaba problemas debido a la cantidad de ruido de nuestras señales de presión. Cuando esto ocurre, lo mejor es utilizar el análisis de la densidad de la potencia espectral. En términos generales, el análisis PSD subdivide la muestra en varias ventanas de acción y en cada una de ellas realiza la transformada de Fourier.

Su implementación en MATLAB se realiza a través del comando *pwelch*, en el cual se debe indicar el vector presión, el tipo de ventana y la longitud de la misma, así como el tanto por ciento de superposición de los datos (overlapping). Además, se debe indicar la frecuencia de muestreo. Para introducir una señal de presión en el comando *pwelch* antes se normaliza de tal modo que se resta a cada valor del vector el valor de la media del vector mediante el comando *detrend*.

El resultado será un valor de presión al cuadrado entre hercios. Podemos normalizar el resultado si dividimos la potencia espectral entre su valor máximo, de tal modo, que el valor de frecuencia característica o predominante corresponderá a un valor de 1 en el eje y.

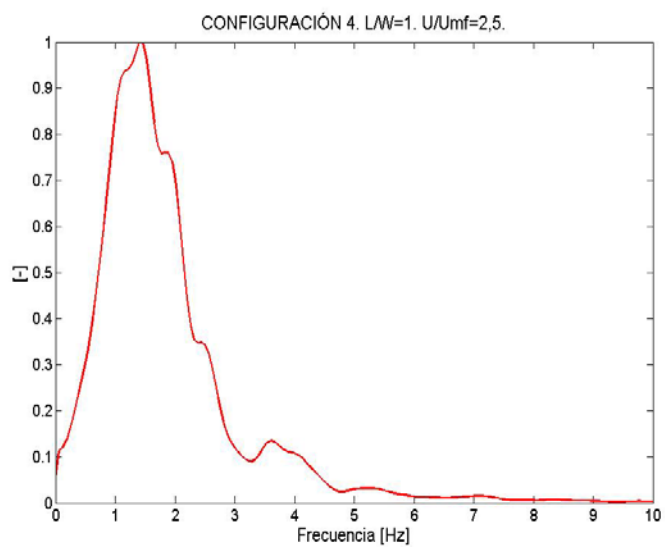
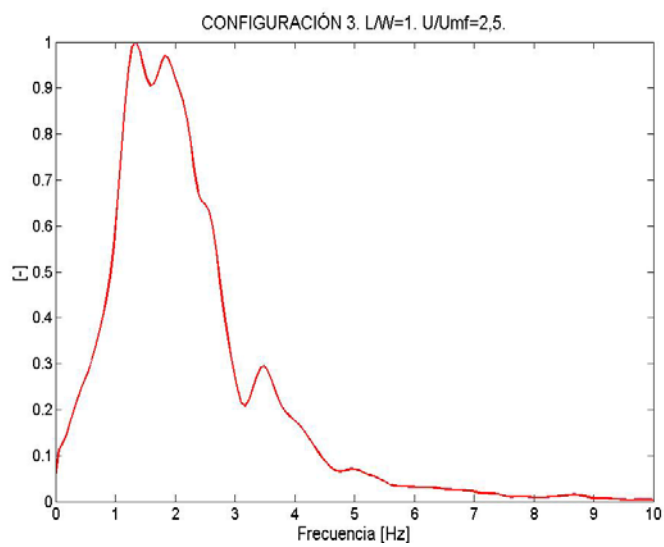
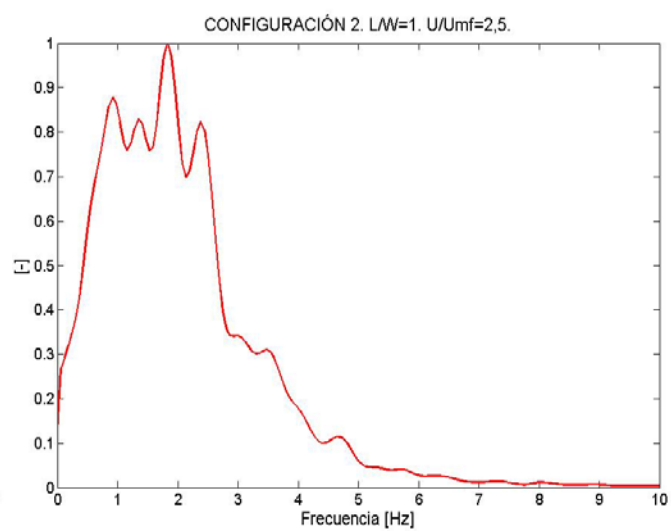
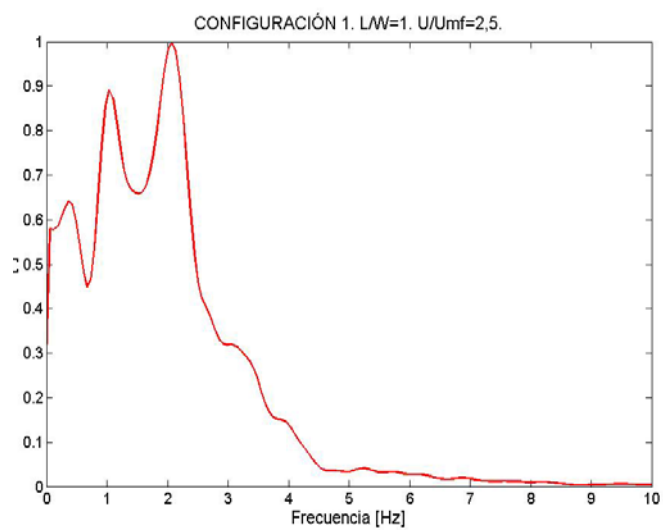
6.2 Descripción de las medidas

- Frecuencia de muestreo, $F_s=2000$ Hz. La frecuencia máxima que podría darse en un lecho fluidizado es de 10 Hz, así que para respetar el Teorema de Nyquist como mínimo habría que medir a 20Hz. Por tanto, la frecuencia de muestreo es más que suficiente para obtener una medición correcta.
- Tiempo de muestreo: 50 segundos.
- El número de periodogramas mínimo para obtener una buena relación entre la resolución y el error es de 20. Según, Sánchez-Delgado S. [5].
- Ventana tipo Hanning.
- Overlapping del 50%.
- Se realiza la comparación de la frecuencia característica para las cuatro configuraciones de agujeros estudiadas bajo las condiciones de operación de ratio de aspecto, $L/W=1$, $L/W=1,333$, $L/W=1,667$ y exceso de aire de $U/U_{mf}=2,5$.

6.3 Resultados

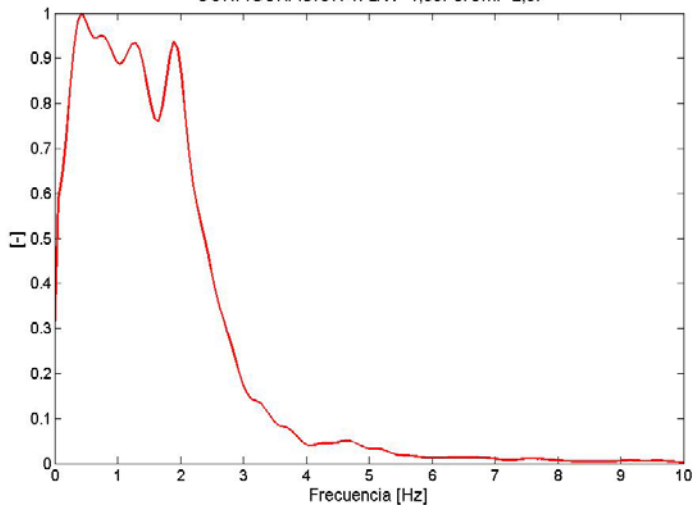
A continuación se adjuntan las imágenes correspondientes al análisis PSD para cada uno de los casos ensayados:

RELACIÓN DE ASPECTO L/W=1

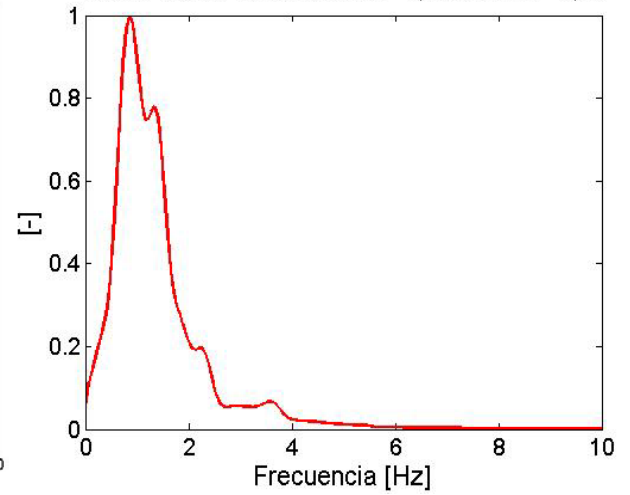


RELACIÓN DE ASPECTO $L/W=1,333$

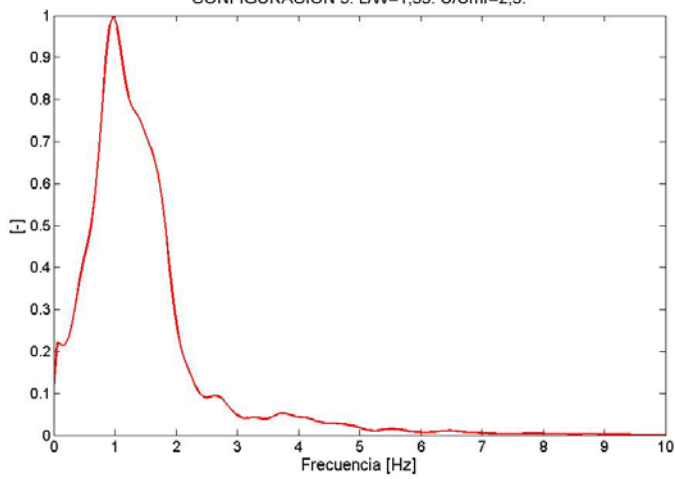
CONFIGURACIÓN 1. $LW=1,33$. $U/U_{mf}=2,5$.



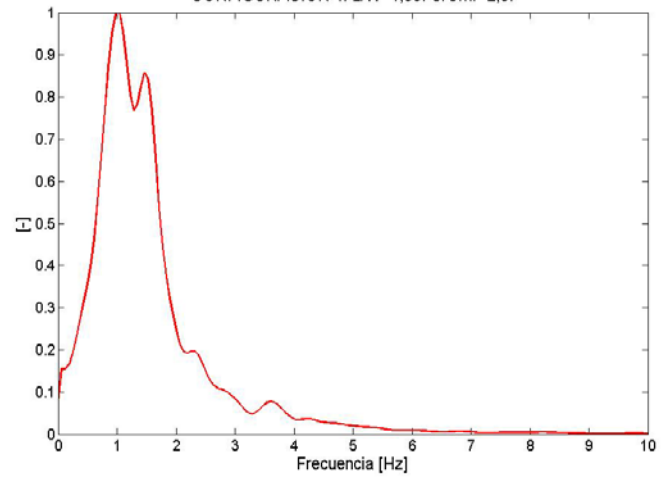
CONFIGURACIÓN 2. $LW=1,33$. $U/U_{mf}=2,5$.



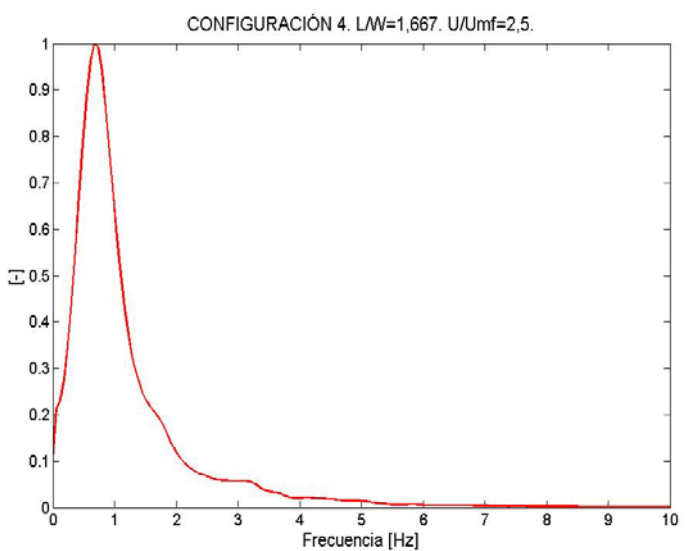
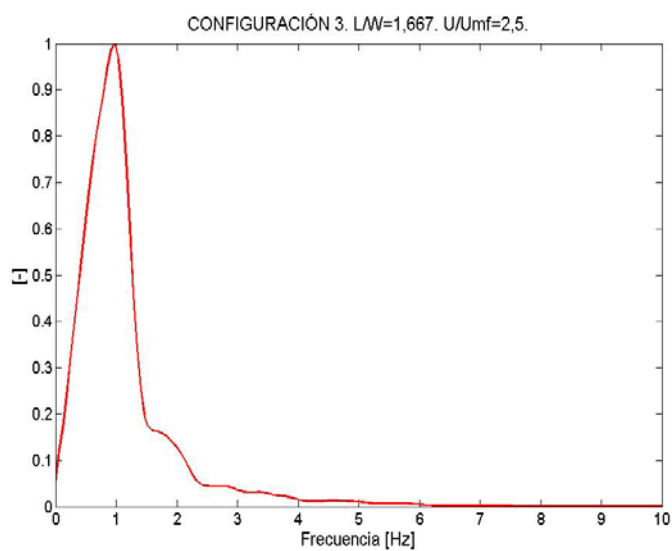
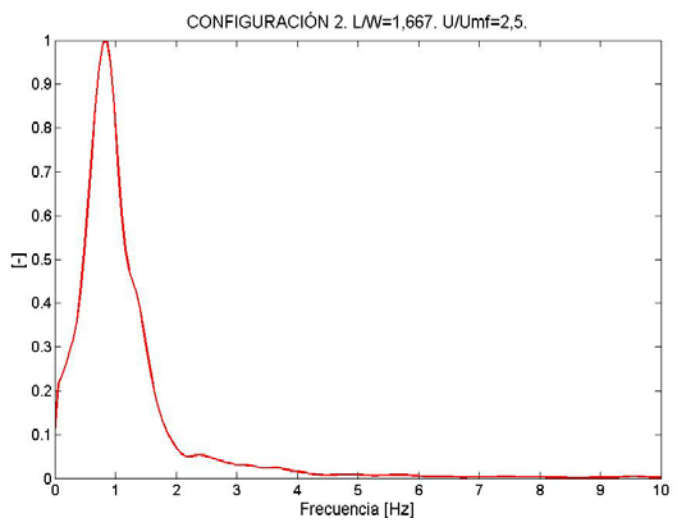
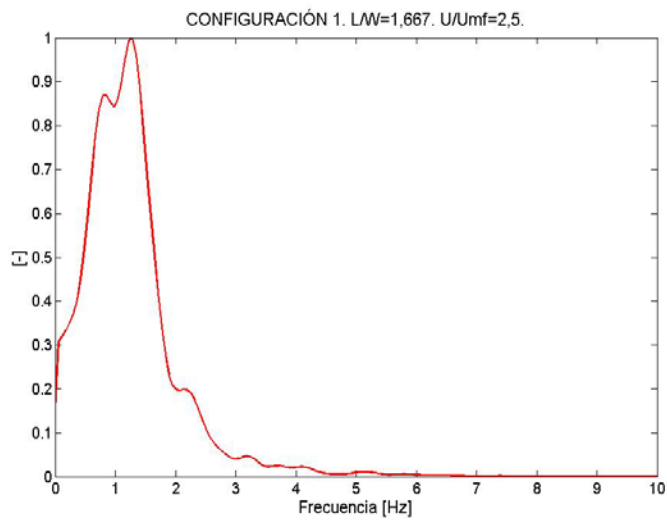
CONFIGURACIÓN 3. $LW=1,33$. $U/U_{mf}=2,5$.



CONFIGURACIÓN 4. $LW=1,33$. $U/U_{mf}=2,5$.



RELACIÓN DE ASPECTO $L/W=1,667$



Para relaciones de aspecto $L/W=1$, las distintas configuraciones del distribuidor muestran un comportamiento similar con varios picos de frecuencias diferenciados y cuyos valores máximo de frecuencia característica se encuentra entre 1,5 Hz y 2,5 Hz.

Para relaciones de aspecto $L/W=1,333$, las distintas configuraciones del distribuidor presentan valores máximos de frecuencia en torno a 1,5 y 2 Hz, salvo la configuración 1 que presenta varios picos diferenciados pero cuyo valor máximo está en torno a 0,5 Hz .

Para relaciones de aspecto $L/W=1,667$, las curvas de la potencia espectral presentan un único pico pronunciado correspondiente a la frecuencia predominante para todos los tipos de configuraciones cuyo valor se encuentra en torno a 1 Hz.

Vemos como desde un análisis general de la densidad de potencia espectral la frecuencia característica del lecho para las distintas configuraciones de distribuidor analizadas se encuentra en torno a valores de 1 y 2,5 Hz para excesos de aire de $U/U_{mf}=2,5$.

Para obtener conclusiones más determinantes sería necesario realizar un análisis espectral que tuviese en cuenta las distintas frecuencias, F_g , F_b , F_e y su relación tanto con las relaciones de aspecto utilizados como con otros excesos de aire para la comparación bajo un mayor rango de condiciones de operación.

7. CONCLUSIONES FINALES Y TRABAJO FUTURO:

7.1 CONCLUSIONES ACADÉMICAS

- Se ha realizado correctamente el montaje y desmontaje del reactor bidimensional para conseguir variar las configuraciones de agujeros requeridas en el ensayo. Además, se ha conseguido solucionar el taponamiento de los agujeros del distribuidor cuando se ha presentado este problema.
- La instalación de aire se ha montado correctamente y se han subsanado los problemas derivados de posibles fugas de aire al paso por componentes cuando se ha presentado este problema.
- Se ha realizado correctamente el montaje de los sensores, de la cámara y del resto de componentes y se ha conseguido adecuar su funcionamiento a las necesidades requeridas en el trabajo.
- Se ha conseguido aprender el funcionamiento general de una herramienta computacional como es MATLAB además de conocer funciones concretas tanto para el procesado de imágenes como para el procesado de señales.
- Se ha realizado el análisis comparativo tanto por medio de imágenes, de gráficas, de tablas y curvas para conocer las diferencias o similitudes entre los objetos de estudio de este trabajo.

7.2 CONCLUSIONES TÉCNICAS

- A velocidades de mínima fluidización, las distintas configuraciones del distribuidor presentan un patrón de flujo diferenciado en la altura a la que se juntan los canales de ascenso que conforman los chorros de agujeros pertenecientes a una misma terna de agujeros. La altura a la que se juntan es mayor cuanto mayor es el número de agujeros abiertos juntos.
- Para excesos de aire mayores que uno, si se analiza un mismo tipo de configuración del distribuidor bajo una misma relación de aspecto, y se varía el exceso de aire, la altura a la que se produce el tránsito entre el modelo de ascenso de dos columnas y el modelo de ascenso de una columna central disminuye con el aumento del exceso de aire. Esto ocurre para las cuatro configuraciones del distribuidor y las tres relaciones de aspecto analizadas.
- Para excesos de aire mayores que uno y todas las relaciones de aspecto, las distintas configuraciones del distribuidor analizadas presentan el mismo tipo de patrón general de ascenso de las burbujas en el lecho en las distintas condiciones de operación analizadas. Este tipo de patrón de flujo es similar al modelo de ascenso de una columna central.

La diferencia principal entre las distintas configuraciones reside en la altura a la que se produce el tránsito entre modelos de ascenso. Así, cuanto mayor es la terna de agujeros abiertos juntos, a menor altura se produce el tránsito entre los dos modelos. Es decir, más predominante es el modelo de una columna central en nuestro lecho.

- A una altura de lecho superior a la altura de la zona de tránsito de cada configuración, las distintas configuraciones se comportan igual dentro de la región del modelo de una columna central, tendiendo a realizarse el paso de las burbujas de manera más predominante por el centro del lecho y siendo aún un camino más centrado cuanto mayor es el exceso de aire.
- La frecuencia característica del lecho analizada para esas condiciones de operación, sufre una variación pequeña con respecto a las distintas configuraciones de agujeros analizadas. Como conclusión general, la frecuencia característica no se ve destacablemente influida por la presencia de distintas configuraciones del distribuidor bajo un análisis general de la densidad de la potencia espectral.

7.3 TRABAJOS FUTUROS

- El análisis de las señales de presión a través de las series temporales de Fourier de una manera detallada para poder obtener las distintas frecuencias características que se presentan en un lecho fluidizado, F_g , F_b , F_e , y la influencia de distintas configuraciones de agujeros de un mismo distribuidor en estas frecuencias, teniendo en cuenta a su vez la influencia de las distintas condiciones de operación en lo referente a la presencia de excesos de aire distintos.
- Estudio de la zona de activación (zona a partir de la cual comienzan a formarse las burbujas) y la influencia en la misma de distintas configuraciones de agujeros del distribuidor.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Grau, O. Farré, *Situación y potencial de valorización energética directa de residuos. Estudio técnico PER 2011-2020*. IDAE, 2011.
- [2] D. Kunii, O. Levenspiel, *Fluidization Engineering*. Butterworth-Heinemann, 1991.
- [3] J. Werther, O. Molerus, *Int. J. Multiphase Flow*, 1993.
- [4] M. Yamazaki, K. Fukuta, J. Tokumoto, in *Proc. 3rd World Cong. Of Chem*, 1986.
- [5] S. Sánchez Delgado, *Two dimensional fluidized bed dynamics*, Thesis for the degree of Doctor of Philosophy
- [6] H. Kage et al, *Frequency analysis of pressure fluctuation in fluidized bed plenum*. Kyushu Institute of Technology.
- [7] F. Jhonson et al, *Characterization of fluidization regimes by time-series analysis of pressure fluctuations*. International Journal of Multiphase flow, 1997.
- [8] C. Alberto et al, *Time series analysis of pressure fluctuation in gas-solid fluidized beds*. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2004.
- [9] J. Ruud van Ommen et al, *Time-series analysis of pressure fluctuation in gas-solid fluidized beds – A review*. International Journal of Multiphase flow, 2010.
- [10] M. Velasco, *Monitorización de un lecho fluidizado mediante acelerometría*. Proyecto Fin de Carrera UC3M, 2013.
- [11] A. Prieto, *Caracterización hidrodinámica de un lecho fluido*. Proyecto Fin de Carrera UC3M.
- [12] M. Ibarra Carrillo, *Análisis espectral de señales periódicas con FFT*. 2009.
- [13] V. Barreira, *Estudio hidrodinámico de un lecho fluidizado*. Proyecto Fin de Carrera UC3M, 2007.

ANEXOS:

ANEXO I: PRESUPUESTO

COMPONENTES	
Reactor de Lecho fluidizado	600 €
SMC Digital Flow Switch PF2A721	300 €
Tubos de PVC Flexible (10 metros)	22 €
Sensor de presión HONEYWELL (x2)	3000 €
Cámara de alta velocidad Basler AG	6000 €
Foco de luz CROMALITE Q750W (x2)	258 €
Bastidor NI cDAQ 9178	1150 €
Tarjeta de adquisición NI 9205	818 €
Ordenador Portátil	500 €
Extras (cables eléctricos, tubos de Grilon, Fuente de Alimentación)	150 €
PROGRAMAS INFORMÁTICOS	
Paquete de Microsoft Office 365	79 €
Licencia de MATLAB uso académico	500 €
MATLAB: Curve Fitting Tool	200 €
MATLAB: Image Processing Toolbox	200 €
MATLAB: Signal Processing Toolbox	200 €
Licencia profesional de LabVIEW	4870 €
TRABAJO	
Ingeniero Junior (18 €/h · 380 h)	6480 €
TOTAL	25127 €

ANEXO II: CÓDIGOS DE MATLAB

CÓDIGO EN MATLAB PARA LA OBTENCIÓN DE LA IMAGEN PROMEDIO EN ESCALA DE GRISES

%Obtención de imagen promedio

```
clear all;  
close all;  
clc;  
k=1;
```

%La dirección habrá que cambiarla según la carpeta de destino de cada tipo de distribuidor->altura del lecho->exceso de aire.

```
dir='H:\Distribuidor 1. UMF y grabación\GRABACIÓN DEFINITIVA (28.7.14) DISTRIBUIDOR 1  
ALTURA 30\distribuidor 1. altura 30. umf. 32L.min\';
```

```
j = 1;  
a = strcat(dir,'i',int2str(j),'.jpg');  
b = imread(a);
```

%También habrá que cambiar los datos de los corchetes, que indican el

%recuadro a recortar. Al tener distintas posiciones de cámara para %cada altura (necesariamente) el tamaño de recortado podrá variar %según cada caso analizado.

```
bcrop=imcrop(b,[195.5 11.5 416 295]); %imagen recortada  
gris=graythresh(bcrop); %Nivel umbral de gris  
sbw=im2bw(bcrop,gris); %Convertir en blanco y negro con ese nivel de gris.  
s = size(sbw); %Tamaño de la matriz  
mat = zeros(s); %obtención del tamaño de matriz necesario para  
guardar imagenes en blanco y negro
```

for h = 1:1:5870 %Contador que realiza el proceso anterior para cada una de las imágenes

```
c = strcat(dir,'i',int2str(h),'.jpg');
```

```
d = imread(c);
```

```
dcrop = imcrop(d,[195.5 11.5 416 295]);
```

```
e = graythresh(dcrop);
```

f=e*1.05; %Aumento o disminución del nivel umbral de gris para aumentar oscuros o claros respectivamente

```
BW = im2bw(dcrop,f);
```

```
mat = mat + BW;
```

```
k=k+1;
```

```
end
```

```
imagenfinal = (mat./((k-1)));
imshow(imagenfinal);
```

CÓDIGO EN MATLAB PARA LA OBTENCIÓN DE LAS GRÁFICAS DE LOS NIVELES DE GRISES PARA DISTINTAS ALTURAS DEL LECHO.

%Codigo obtención línea de grises a distintas alturas

%La imagen está volcada, con la parte izquierda del lecho paralelo al suelo.
 Totalfilas=290; %Equivalente al ancho del lecho al estar la imagen tumbada.
 Totalc=620; %Equivalente al alto de la imagen donde la columna 1 es el punto más alto.
 centi=(Totalfilas/30); %número de pixeles que son un centimetro.
 ancho=(0:(30/(Totalfilas-1)):30);

%Se utiliza el flipud para dar la vuelta al vector ya que la celda 1,2,3.. Corresponde al lado derecho del lecho, por tanto estaríamos en Wx=30cm y nuestro vector ancho empieza desde el 0.

```
columna2y5cm=flipud(z(:,round((Totalc-2.5*centi))));
columna5cm=flipud(z(:,round((Totalc-5*centi))));
columna7y5cm=flipud(z(:,round((Totalc-7.5*centi))));
columna10cm=flipud(z(:,round((Totalc-10*centi))));
columna12y5cm=flipud(z(:,round((Totalc-12.5*centi))));
columna15cm=flipud(z(:,round((Totalc-15*centi))));
columna17y5cm=flipud(z(:,round((Totalc-17.5*centi))));
columna20cm=flipud(z(:,round((Totalc-20*centi))));
columna22y5cm=flipud(z(:,round((Totalc-22.5*centi))));
columna25cm=flipud(z(:,round((Totalc-25*centi))));
columna27y5cm=flipud(z(:,round((Totalc-27.5*centi))));
columna30cm=flipud(z(:,round((Totalc-30*centi))));
```

```
figure
subplot(2,6,1),plot(ancho,columna2y5cm)
title('2.5 cm')
ylabel('Escala de grises','FontName','Arial','FontSize',10)
ylim([0 1])
xlabel('W (cm)','FontName','Arial','FontSize',10)
xlim([0 30])
```

```
subplot(2,6,2),plot(ancho,columna5cm)
title('5 cm')
ylabel('Escala de grises','FontName','Arial','FontSize',10)
ylim([0 1])
xlabel('W (cm)','FontName','Arial','FontSize',10)
xlim([0 30])
```

```
subplot(2,6,3),plot(ancho,columna7y5cm)
```



```

title('7.5 cm')
ylabel('Escala de grises','FontName','Arial','FontSize',10)
ylim([0 1])
xlabel('W (cm)','FontName','Arial','FontSize',10)
xlim([0 30])

```

```

subplot(2,6,4),plot(ancho,columna10cm)
title('10 cm')
ylabel('Escala de grises','FontName','Arial','FontSize',10)
ylim([0 1])
xlabel('W (cm)','FontName','Arial','FontSize',10)
xlim([0 30])

```

```

subplot(2,6,5),plot(ancho,columna12y5cm)
title('12.5 cm')
ylabel('Escala de grises','FontName','Arial','FontSize',10)
ylim([0 1])
xlabel('W (cm)','FontName','Arial','FontSize',10)
xlim([0 30])

```

```

subplot(2,6,6),plot(ancho,columna15cm)
title('15 cm')
ylabel('Escala de grises','FontName','Arial','FontSize',10)
ylim([0 1])
xlabel('W (cm)','FontName','Arial','FontSize',10)
xlim([0 30])

```

```

subplot(2,6,7),plot(ancho,columna17y5cm)
title('17.5 cm')
ylabel('Escala de grises','FontName','Arial','FontSize',10)
ylim([0 1])
xlabel('W (cm)','FontName','Arial','FontSize',10)
xlim([0 30])

```

```

subplot(2,6,8),plot(ancho,columna20cm)
title('20 cm')
ylabel('Escala de grises','FontName','Arial','FontSize',10)
ylim([0 1])
xlabel('W (cm)','FontName','Arial','FontSize',10)
xlim([0 30])

```

```

subplot(2,6,9),plot(ancho,columna22y5cm)
title('22.5 cm')
ylabel('Escala de grises','FontName','Arial','FontSize',10)
ylim([0 1])
xlabel('W (cm)','FontName','Arial','FontSize',10)
xlim([0 30])

```

```
subplot(2,6,10),plot(ancho,columna25cm)
title('25 cm')
ylabel('Escala de grises','FontName','Arial','FontSize',10)
ylim([0 1])
xlabel('W (cm)','FontName','Arial','FontSize',10)
xlim([0 30])
```

```
subplot(2,6,11),plot(ancho,columna27y5cm)
title('27.5 cm')
ylabel('Escala de grises','FontName','Arial','FontSize',10)
ylim([0 1])
xlabel('W (cm)','FontName','Arial','FontSize',10)
xlim([0 30])
```

```
subplot(2,6,12),plot(ancho,columna30cm)
title('30 cm')
ylabel('Escala de grises','FontName','Arial','FontSize',10)
ylim([0 1])
xlabel('W (cm)','FontName','Arial','FontSize',10)
xlim([0 30])
```

ANEXO III: OBTENCIÓN DE LA ZONA DE TRÁNSITO ENTRE EL MODELO DE ASCENSO DE DOS COLUMNAS Y EL MODELO DE ASCENSO DE UNA COLUMNA CENTRAL. GRÁFICAS DE NIVELES DE GRISES A DISTINTAS ALTURAS DE LECHO.

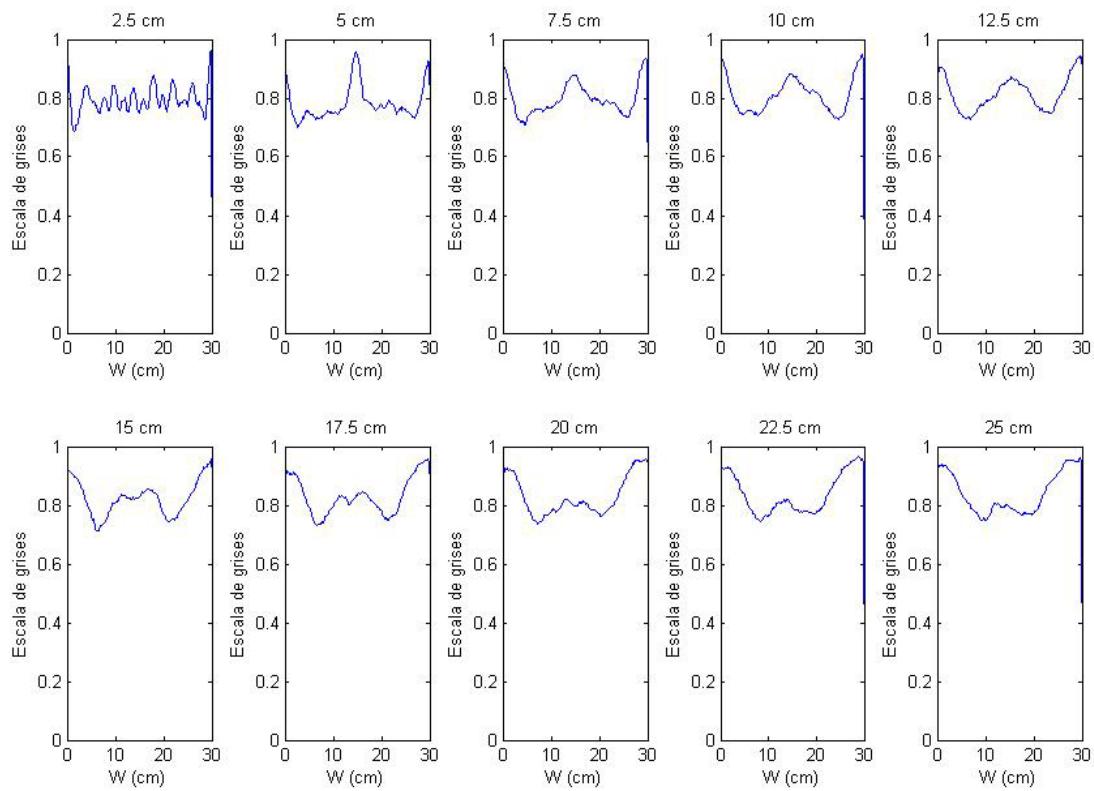


Imagen 1: Configuración 1. $L/W=1$. $U/U_{mf}=1.5$.

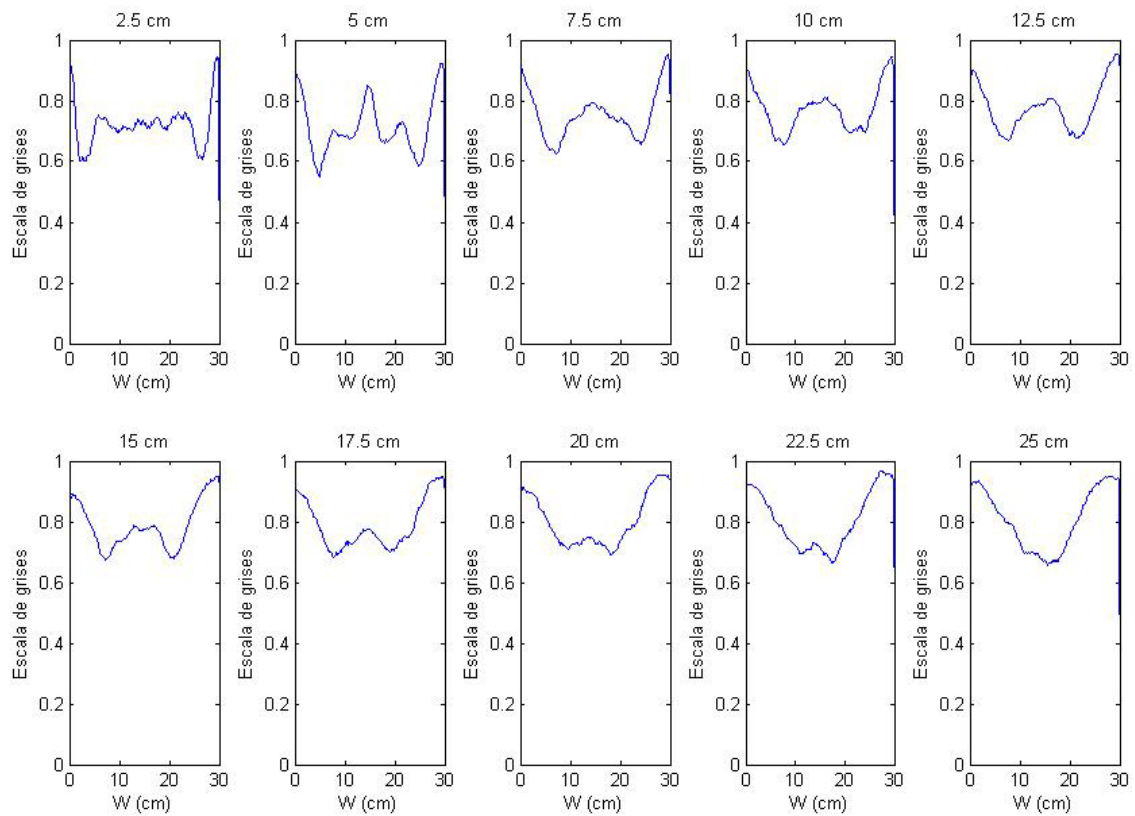


Imagen 2: Configuración 1. $L/W=1$. $U/U_{mf}=2$.

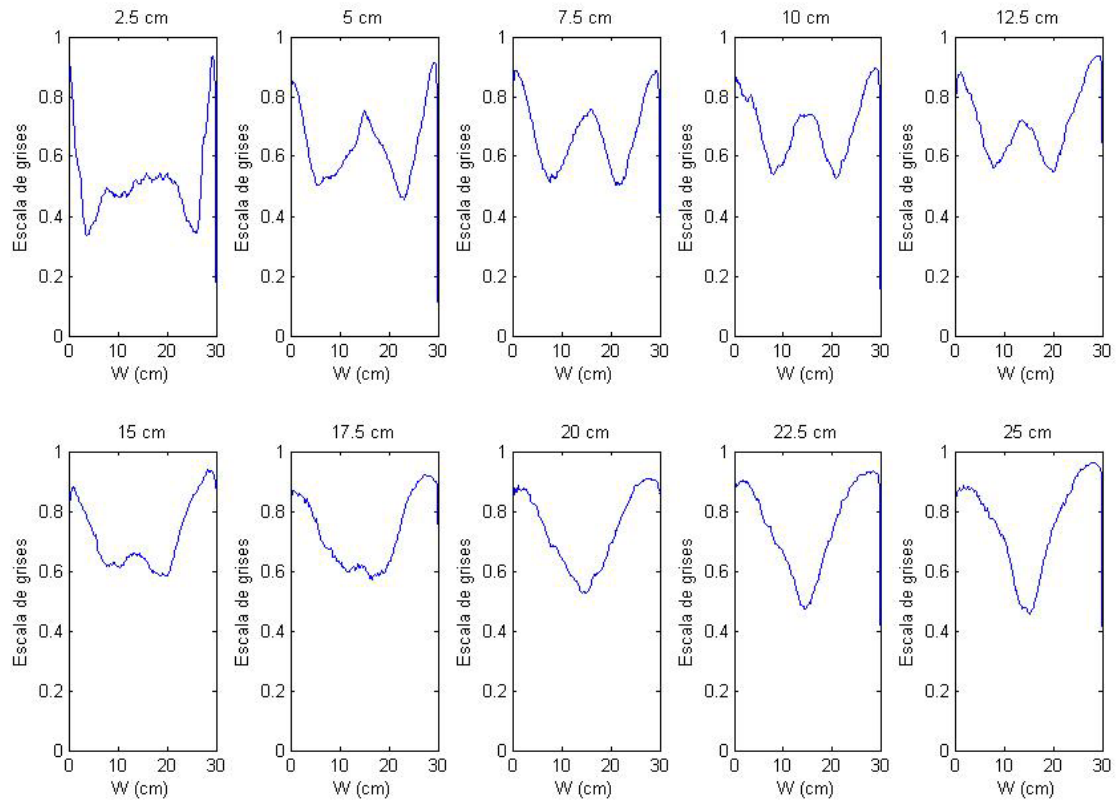


Imagen 3: Configuración 1. $L/W=1$. $U/U_{mf}=2,5$.

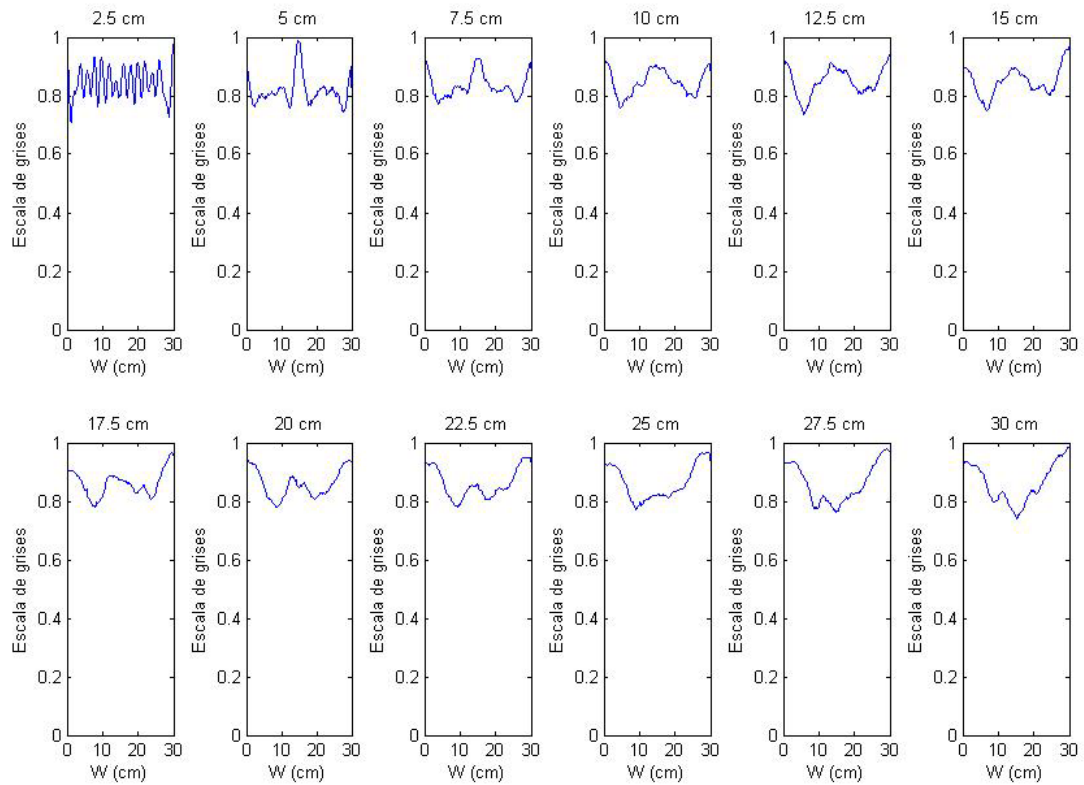


Imagen 4: Configuración 1. $L/W=1,33$. $U/U_{mf}=1,5$.

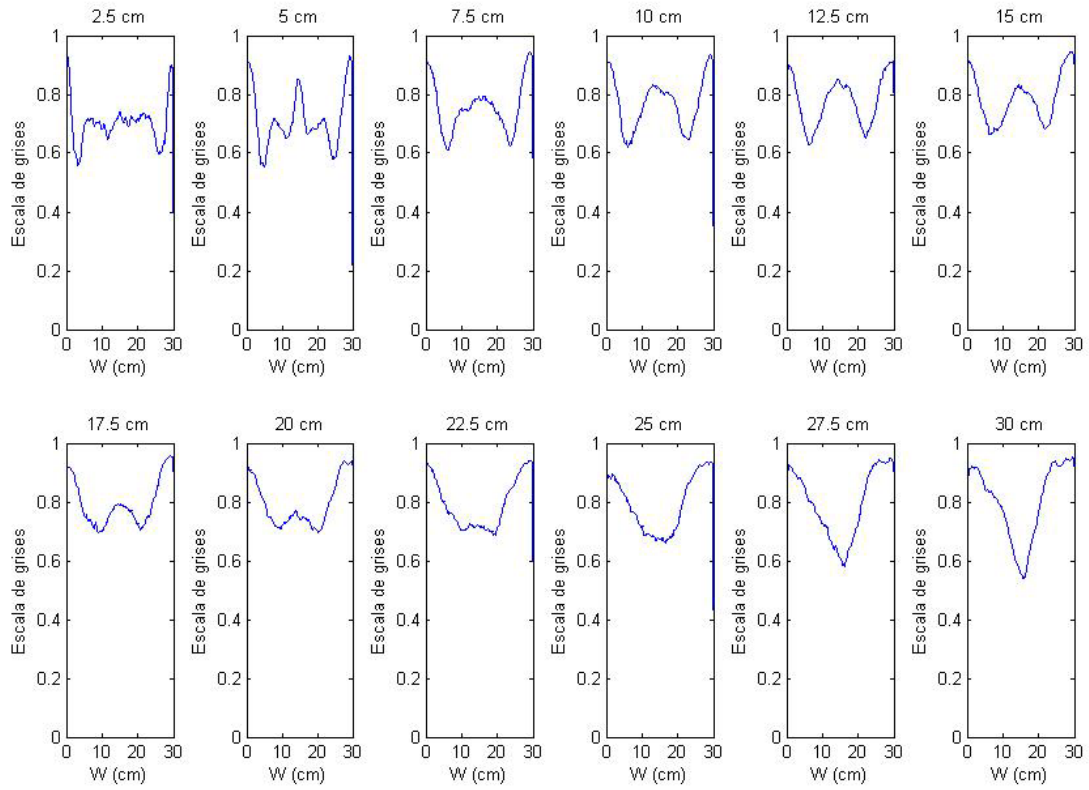


Imagen 5: Configuración 1. $L/W=1,33$. $U/U_{mf}=2$.

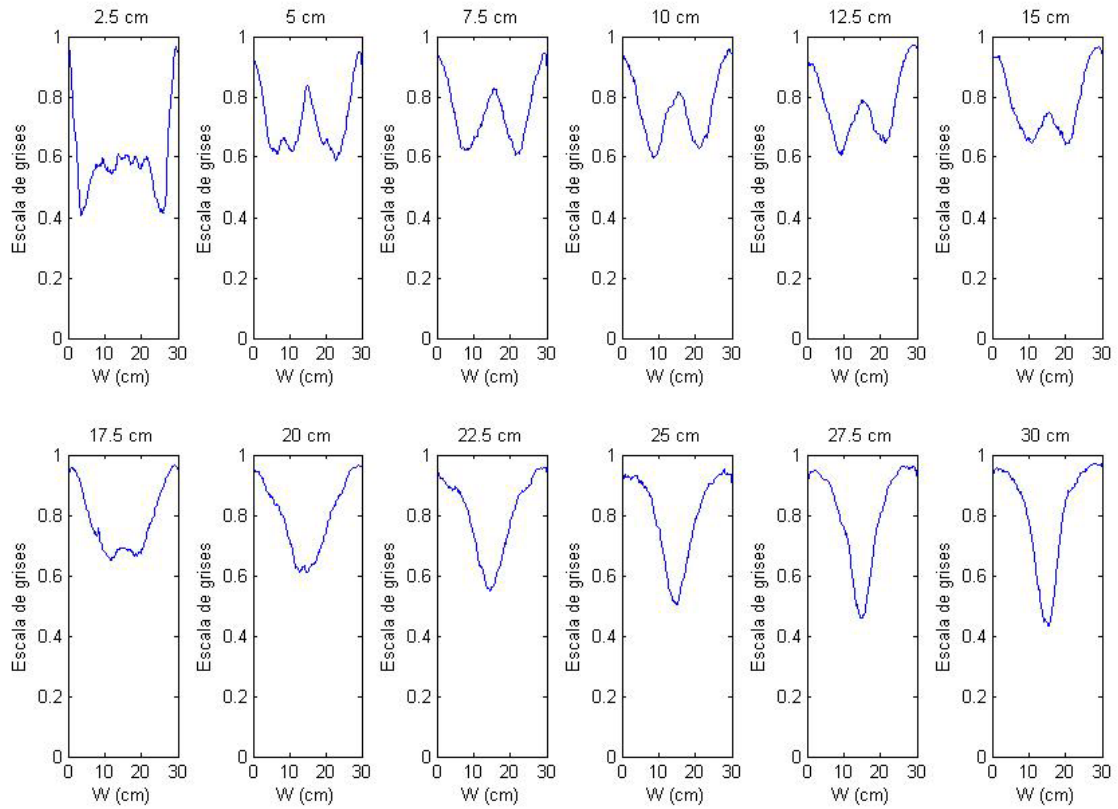


Imagen 6: Configuración 1. $L/W=1,33$. $U/U_{mf}=2,5$.

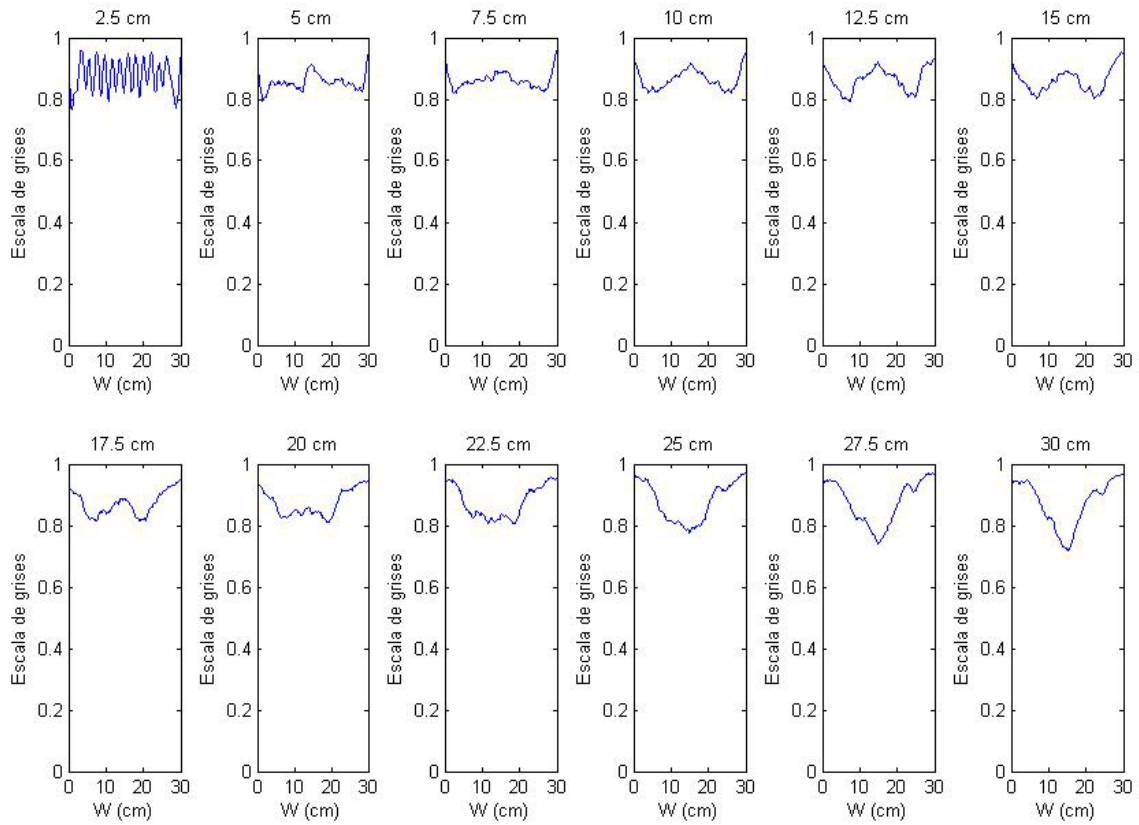


Imagen 7: Configuración 1. $L/W=1,667$. $U/U_{mf}=1,5$.

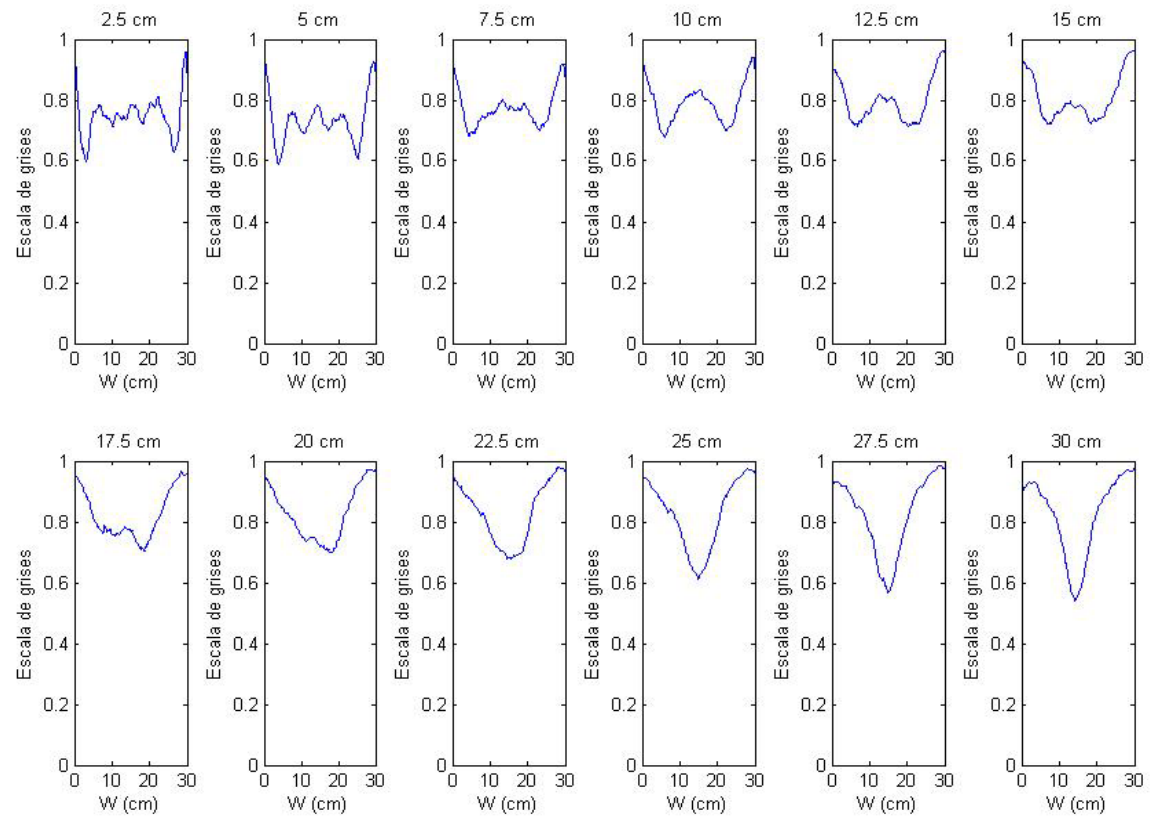


Imagen 8: Configuración 1. $L/W=1,667$. $U/U_{mf}=2$.

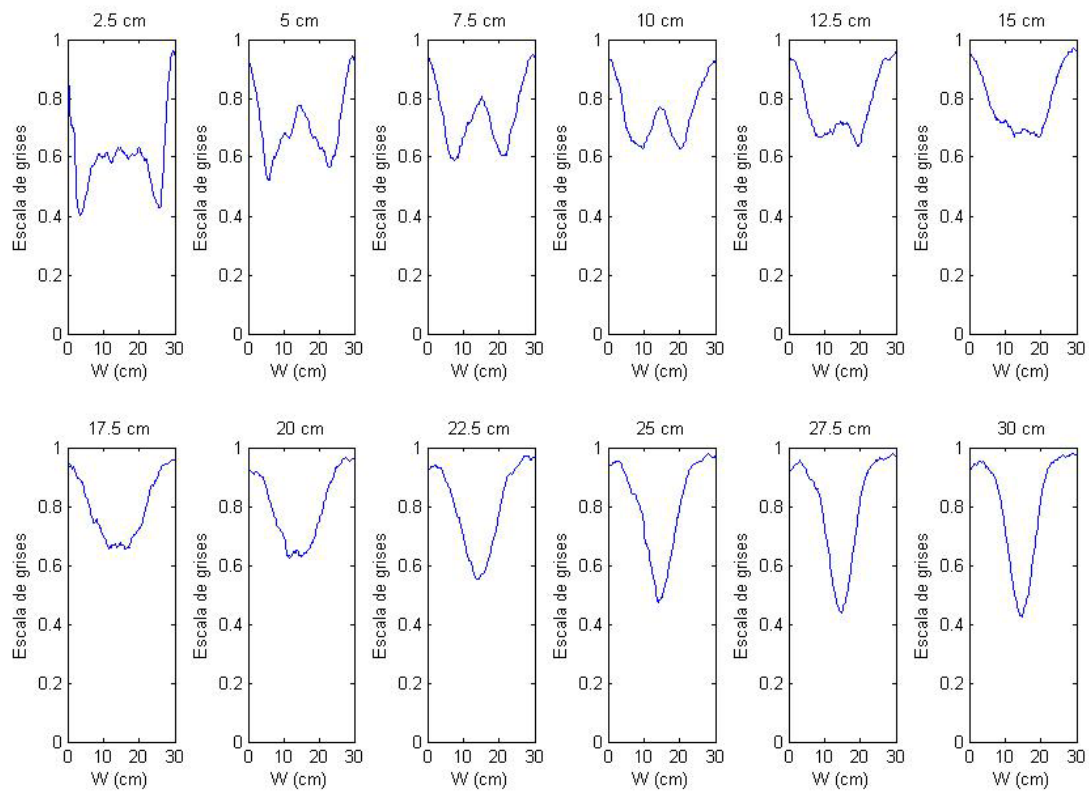


Imagen 9: Configuración 1. $L/W=1,667$. $U/U_{mf}=2,5$.

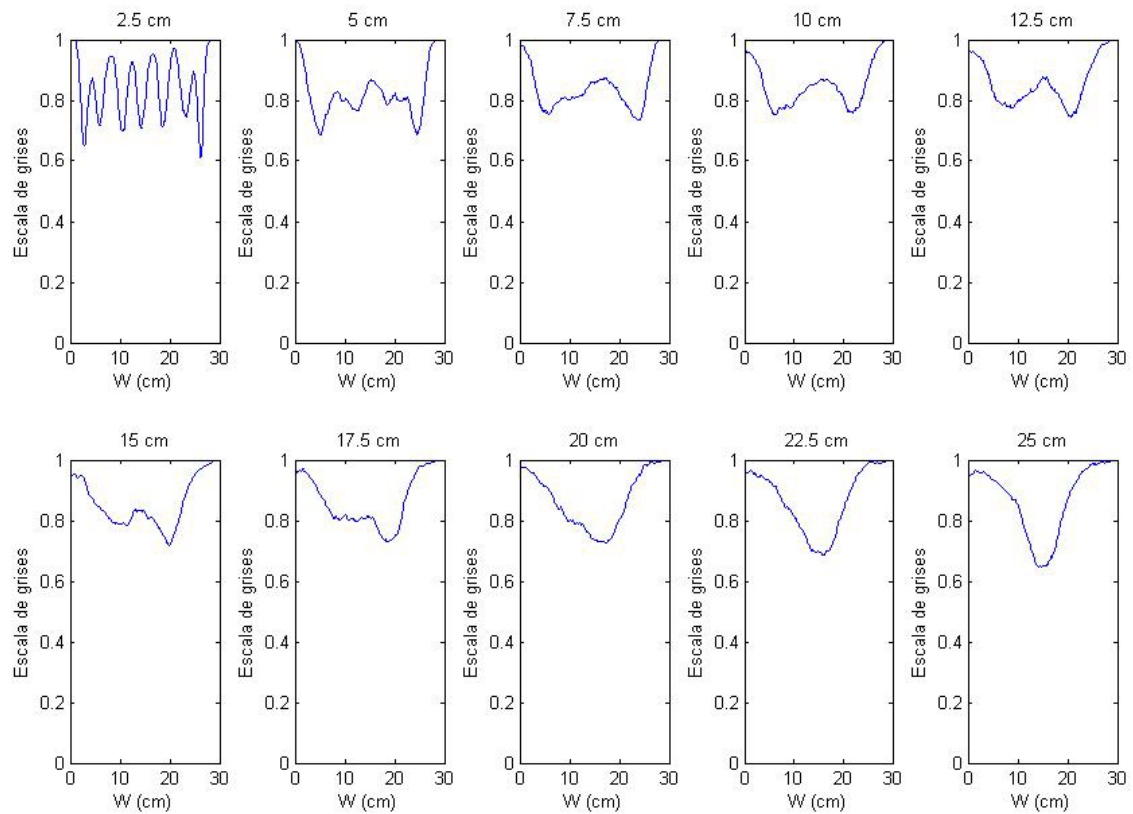


Imagen 10: Configuración 2. $L/W=1$. $U/U_{mf}=1,5$.

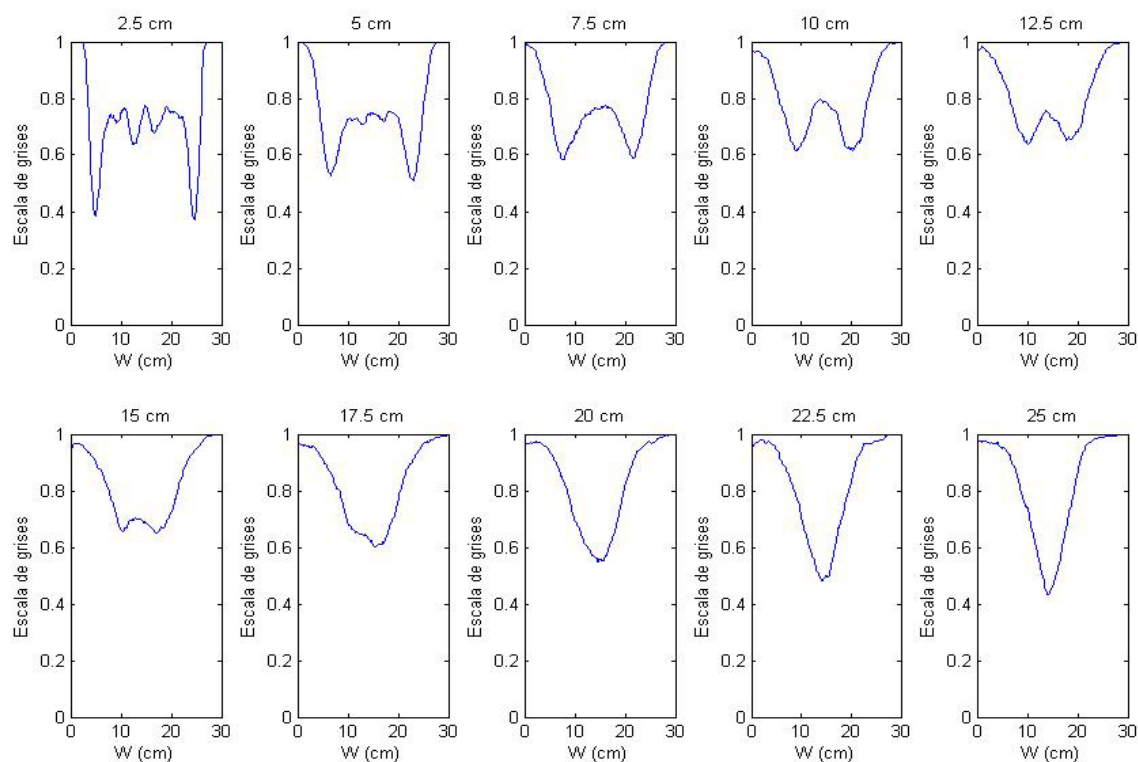


Imagen 11: Configuración 2. $L/W=1$. $U/U_{mf}=2$.

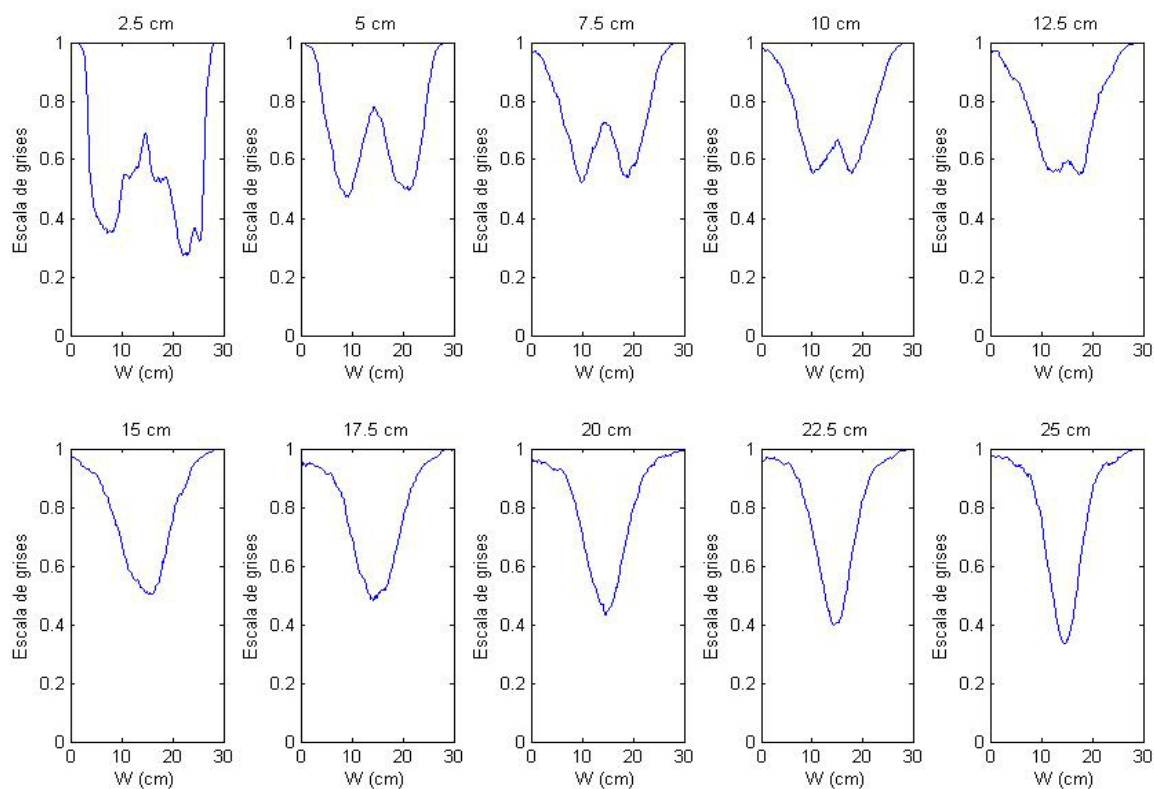


Imagen 12: Configuración 2. $L/W=1$. $U/U_{mf}=2.5$.

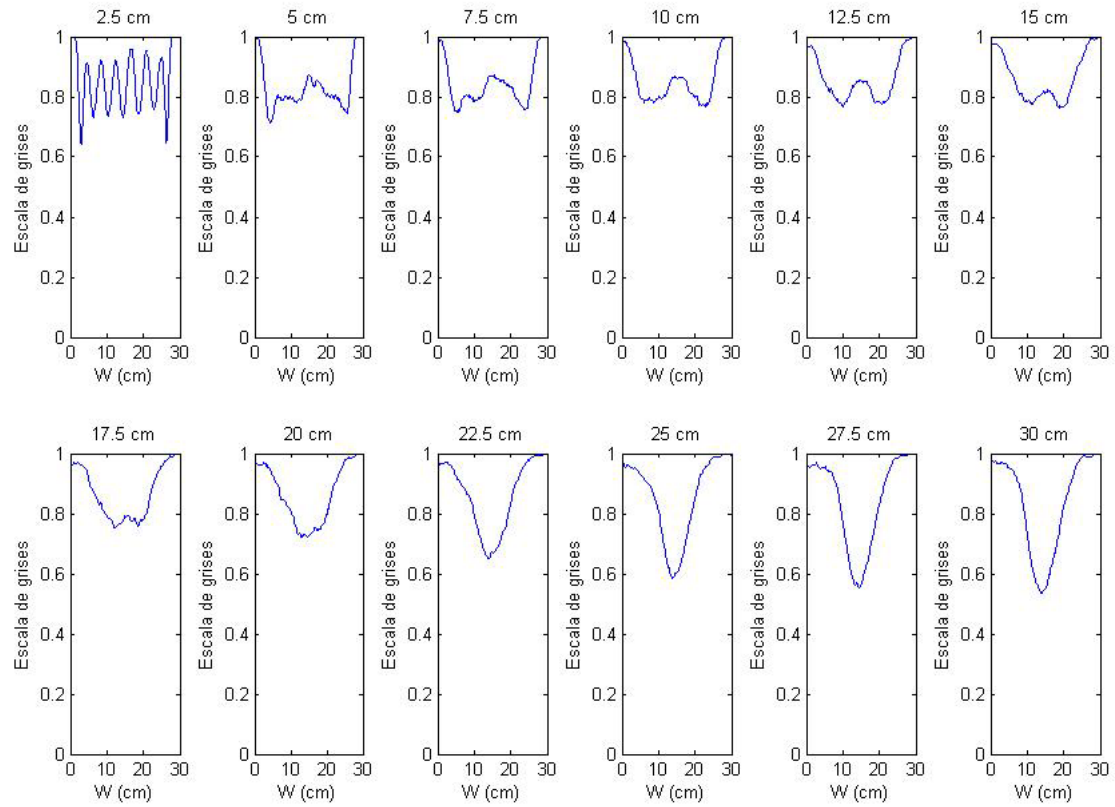


Imagen 13: Configuración 2. $L/W=1.33$. $U/U_{mf}=1.5$.

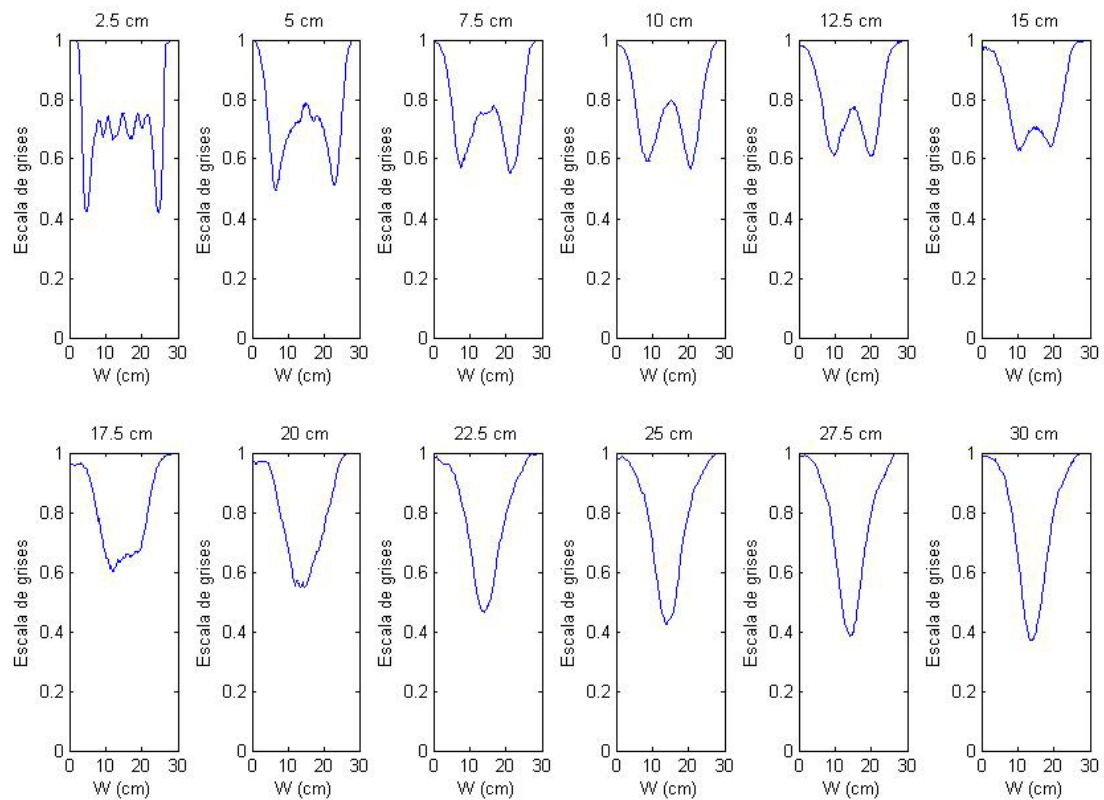


Imagen 14: Configuración 2. $L/W=1.33$. $U/U_{mf}=2$

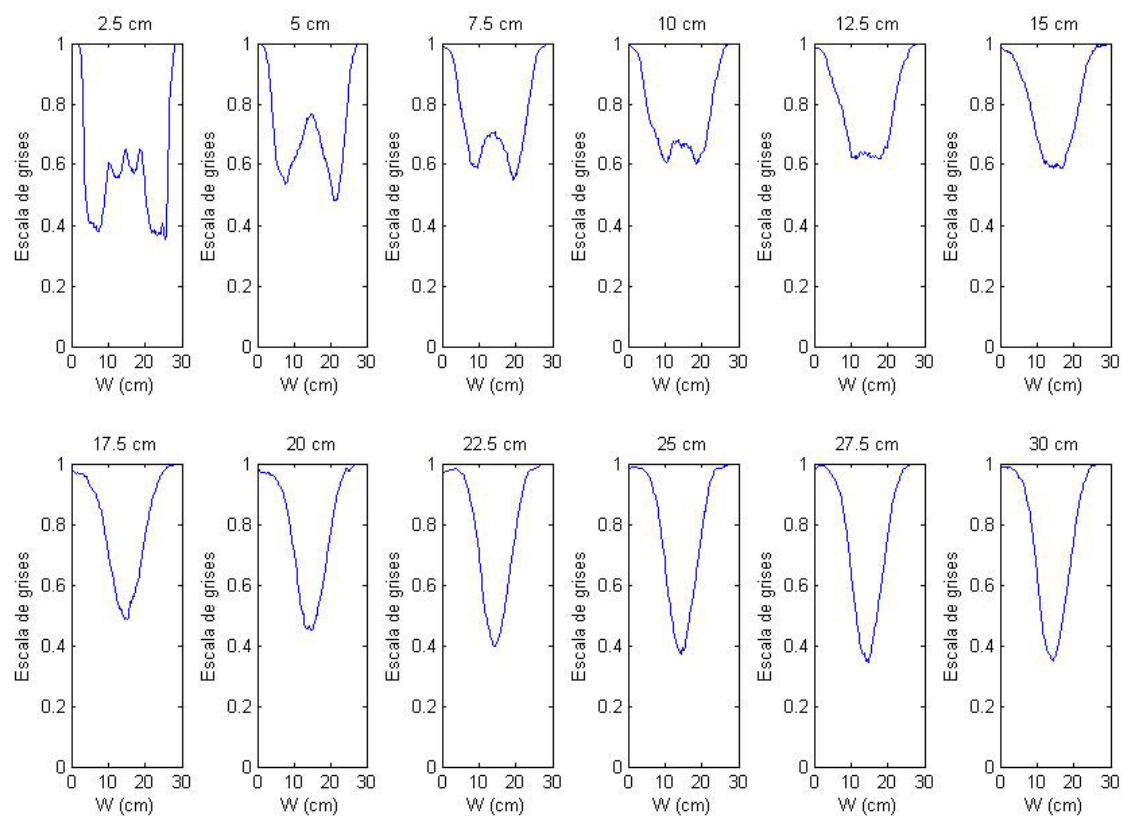


Imagen 15: Configuración 2. $L/W=1,33$. $U/U_{mf}=2,5$.

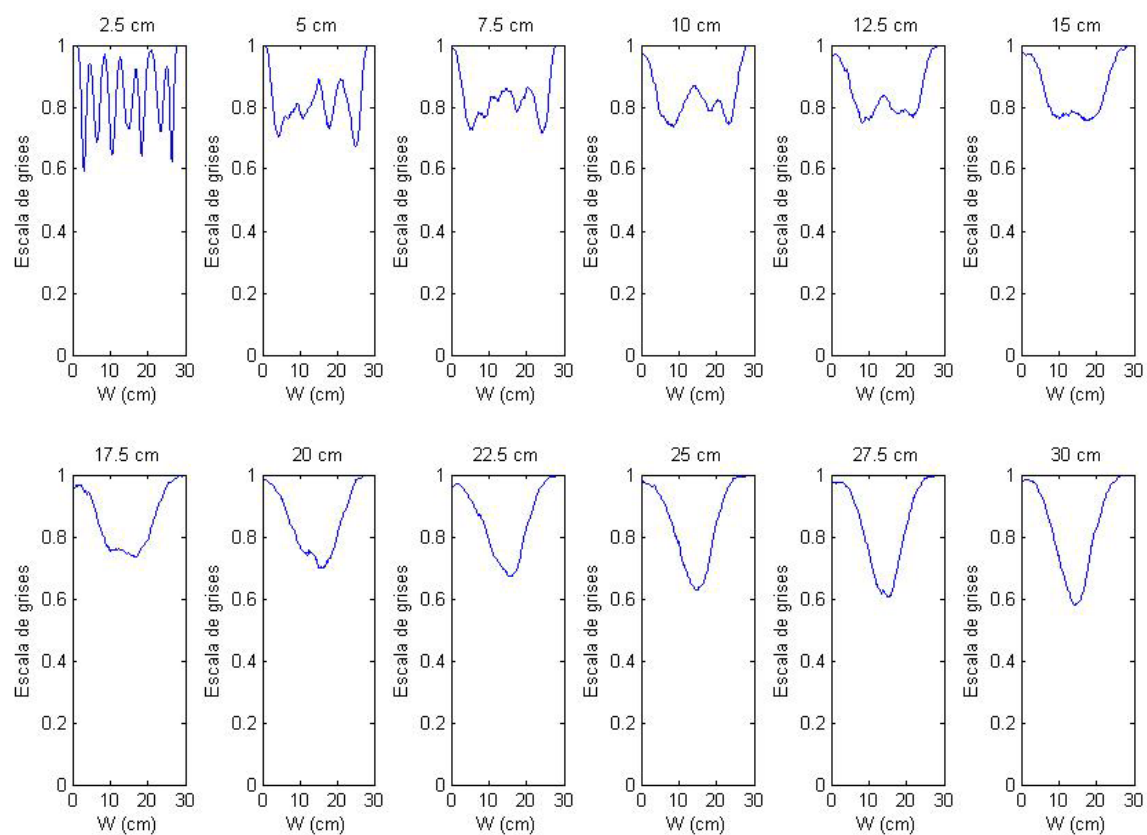


Imagen 16: Configuración 2. $L/W=1,667$. $U/U_{mf}=1,5$.

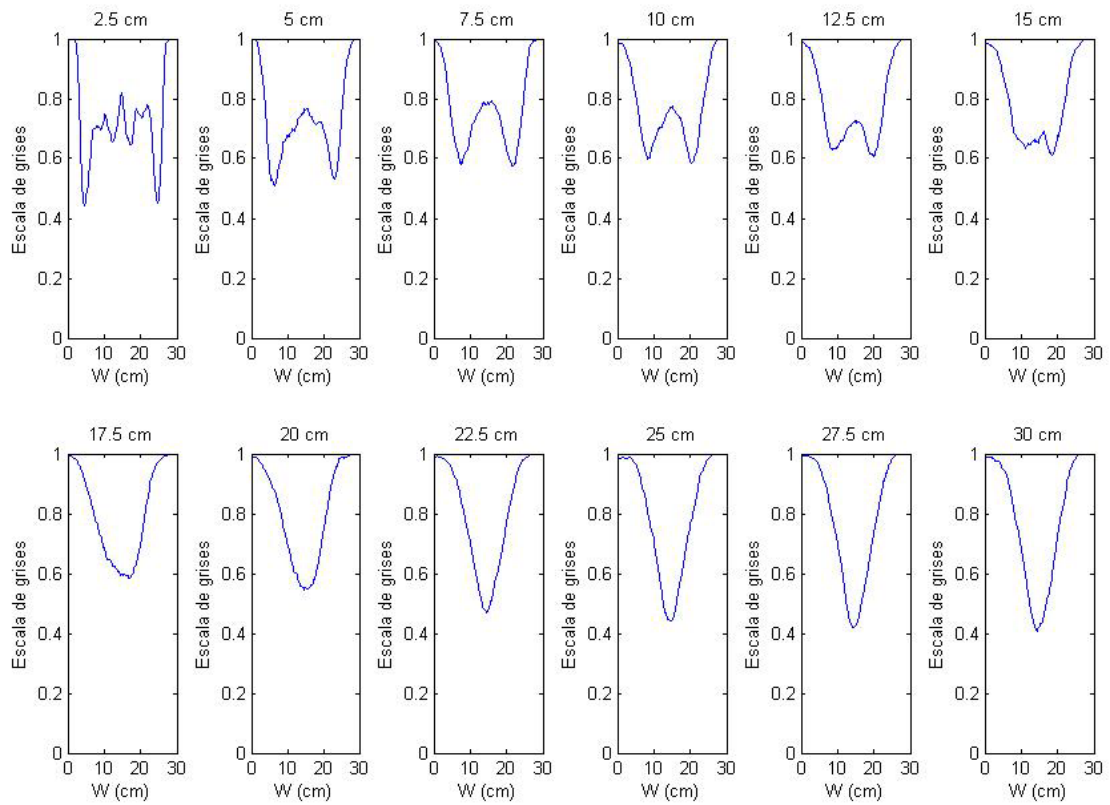


Imagen 17: Configuración 2. $L/W=1,667$. $U/U_{mf}=2$.

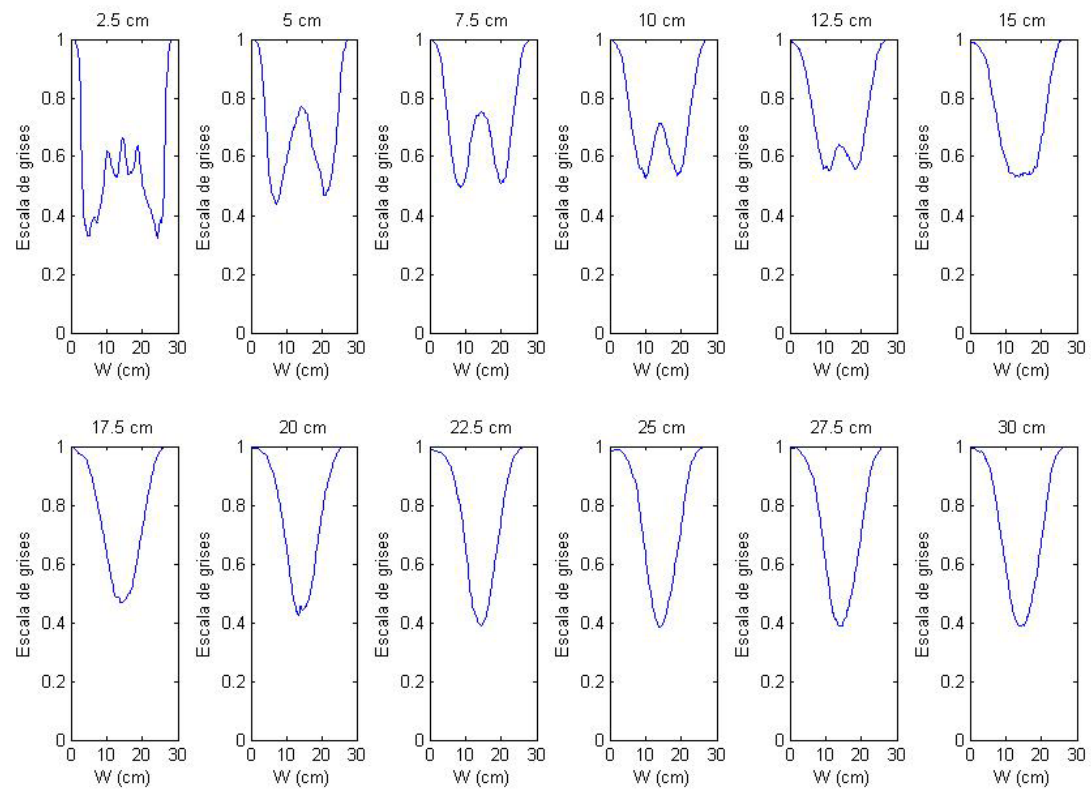


Imagen 18: Configuración 2. $L/W=1,667$. $U/U_{mf}=2,5$.

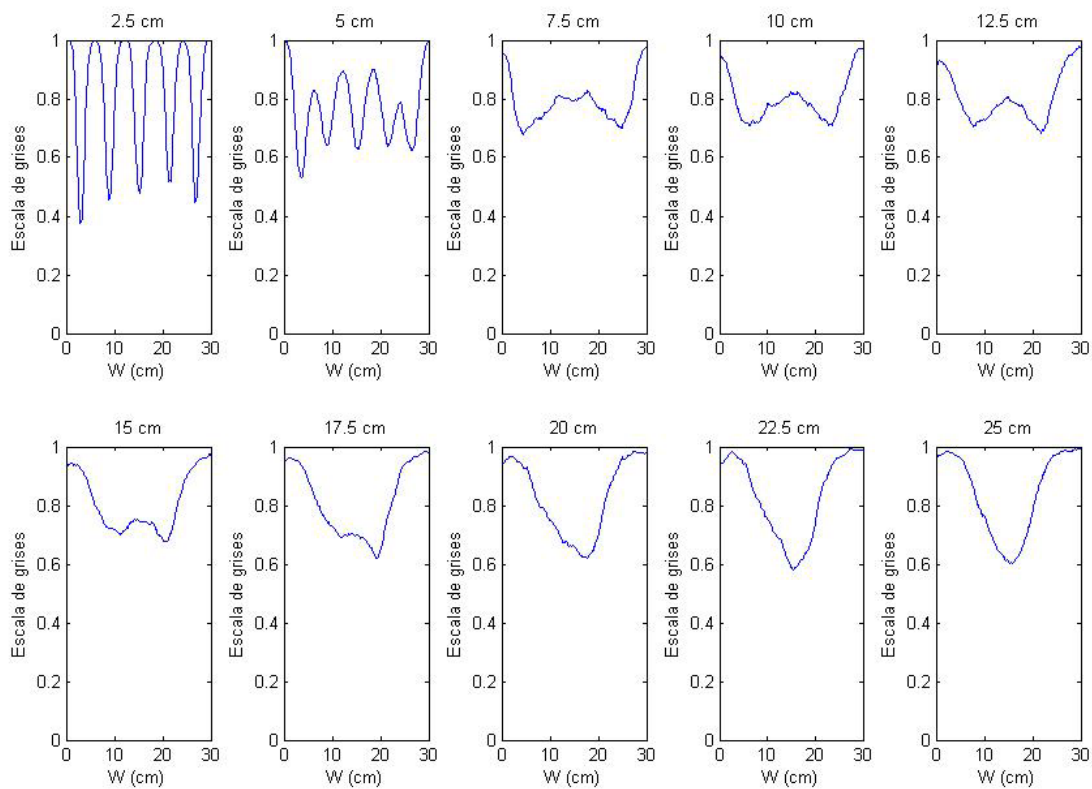


Imagen 19: Configuración 3. $L/W=1$. $U/U_{mf}=1.5$.

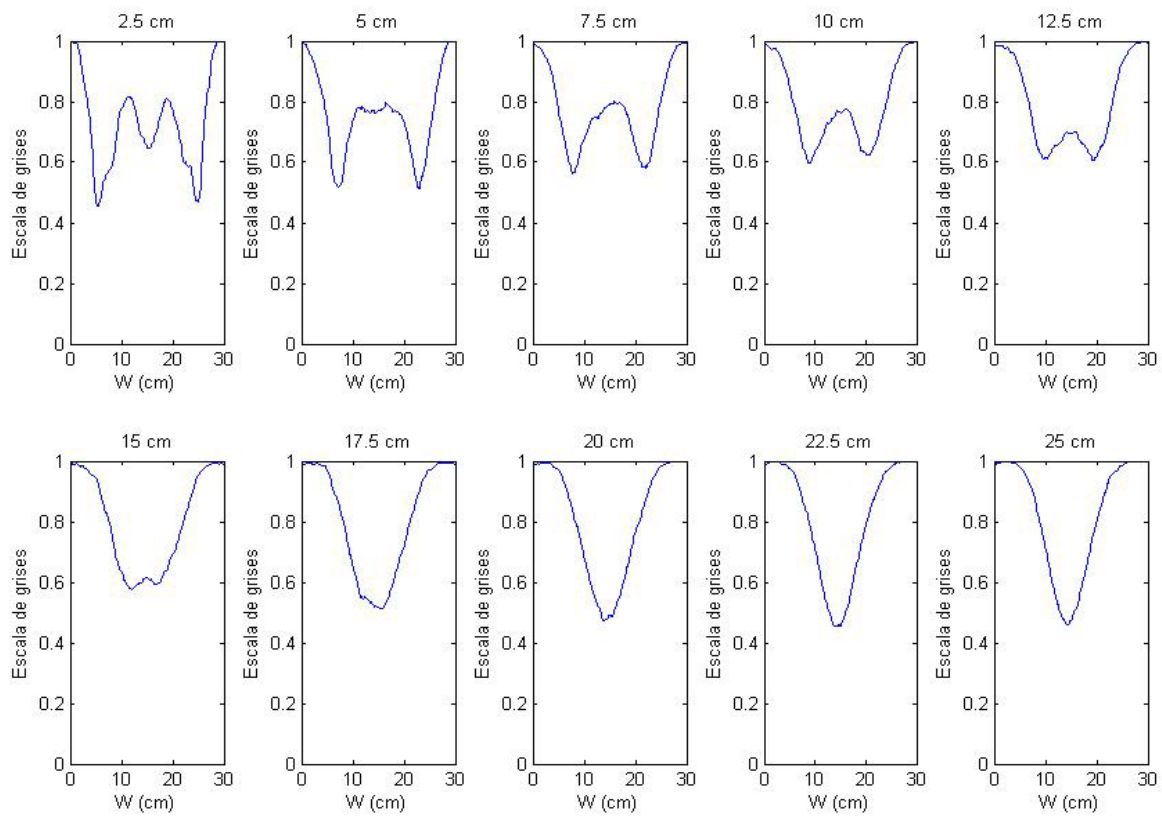


Imagen 20: Configuración 3. $L/W=1$. $U/U_{mf}=2$.

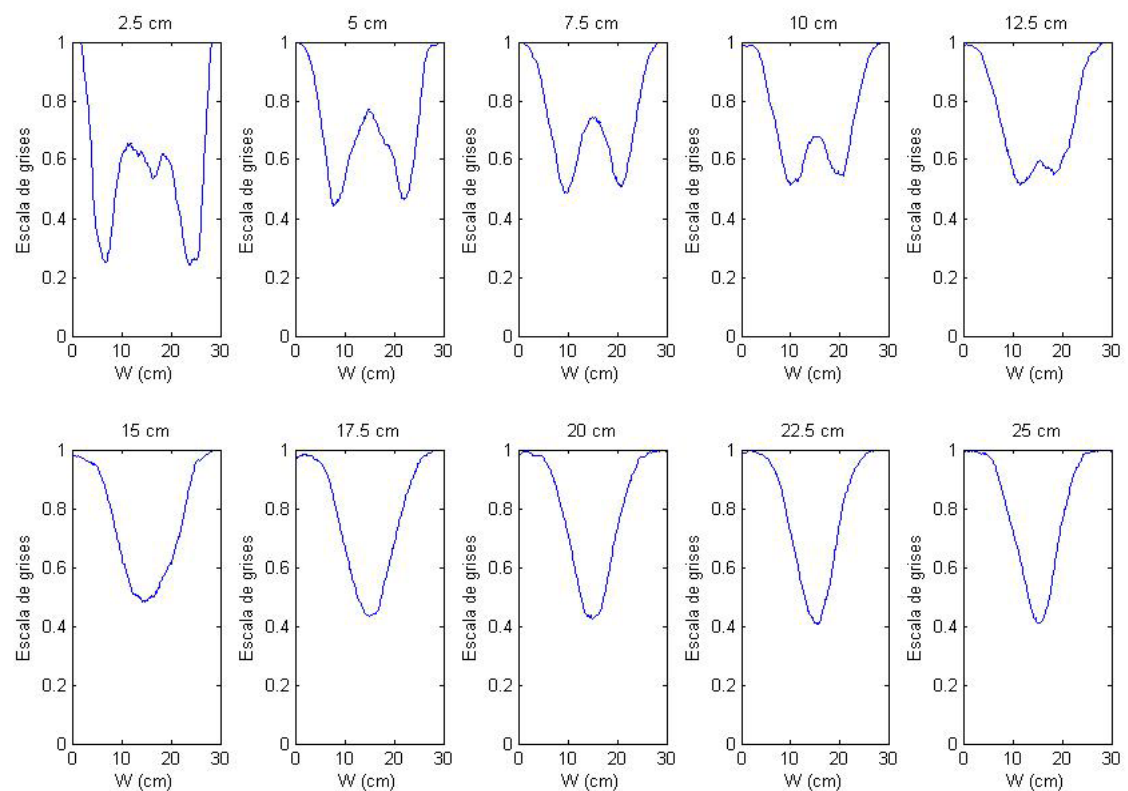


Imagen 21: Configuración 3. $L/W=1$. $U/U_{mf}=2,5$.

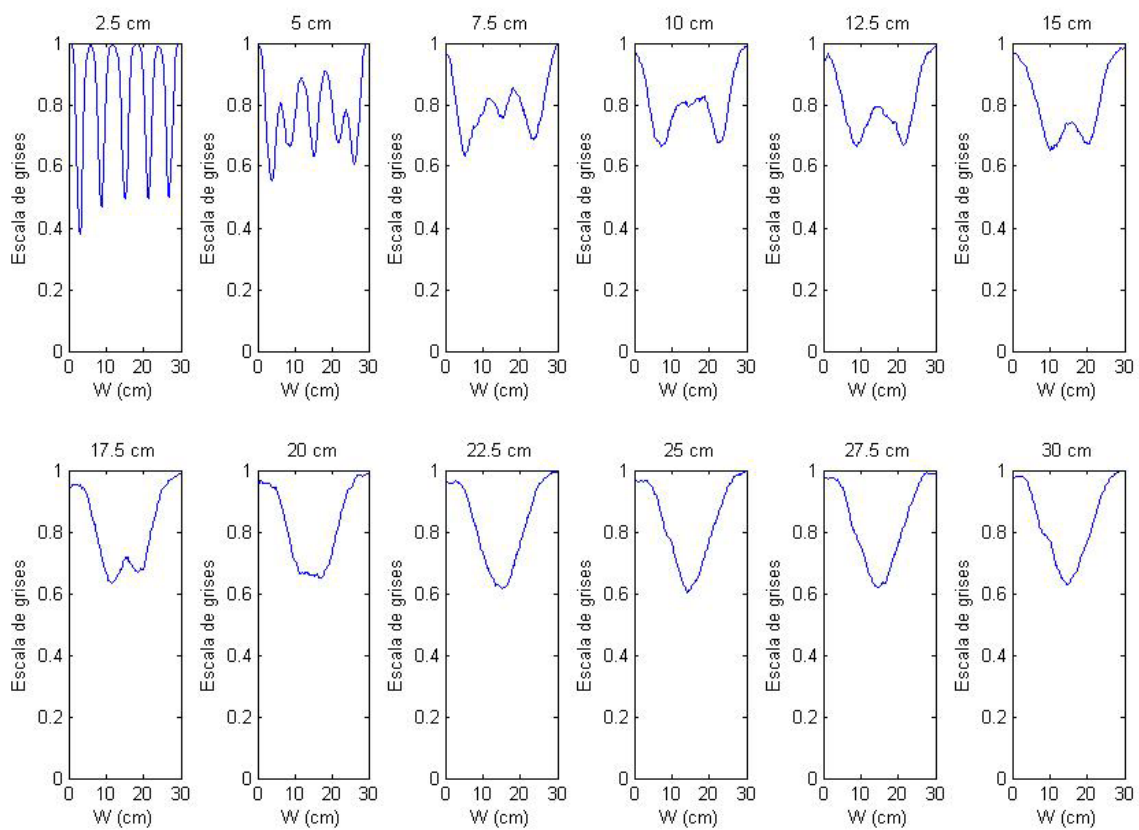


Imagen 22: Configuración 3. $L/W=1,33$. $U/U_{mf}=1,5$.

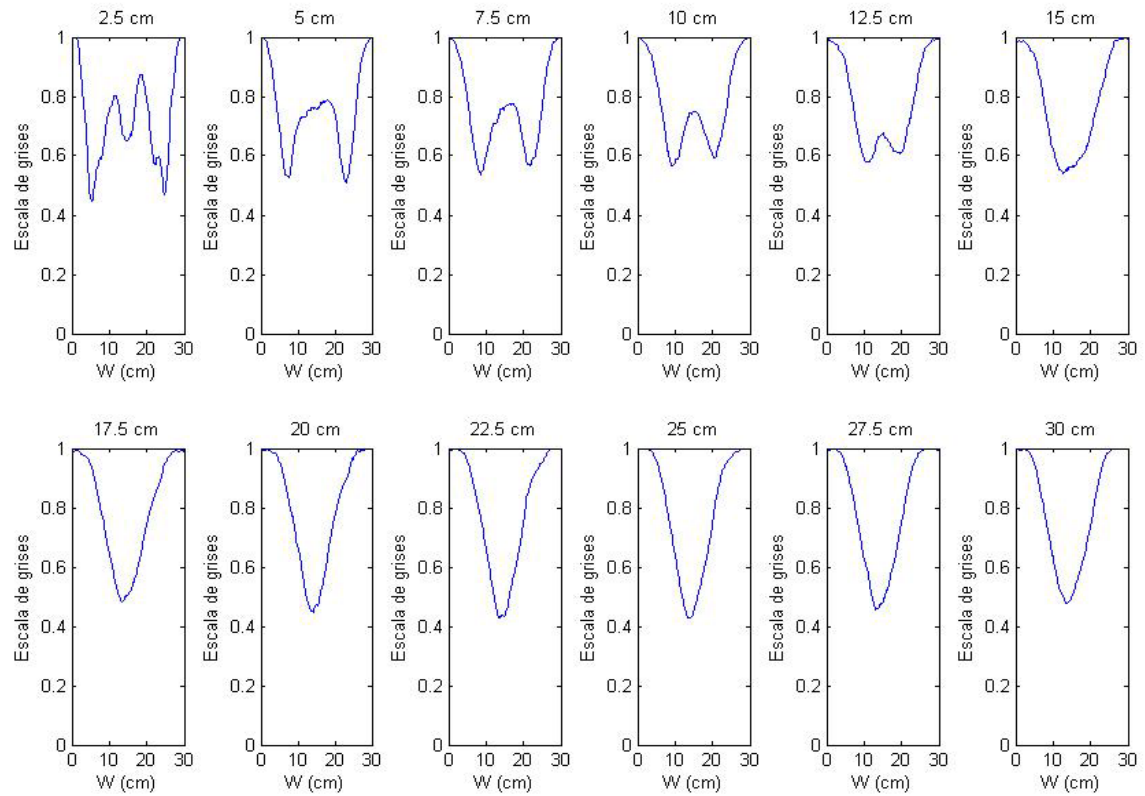


Imagen 23: Configuración 3. $L/W=1.33$. $U/U_{mf}=2$.

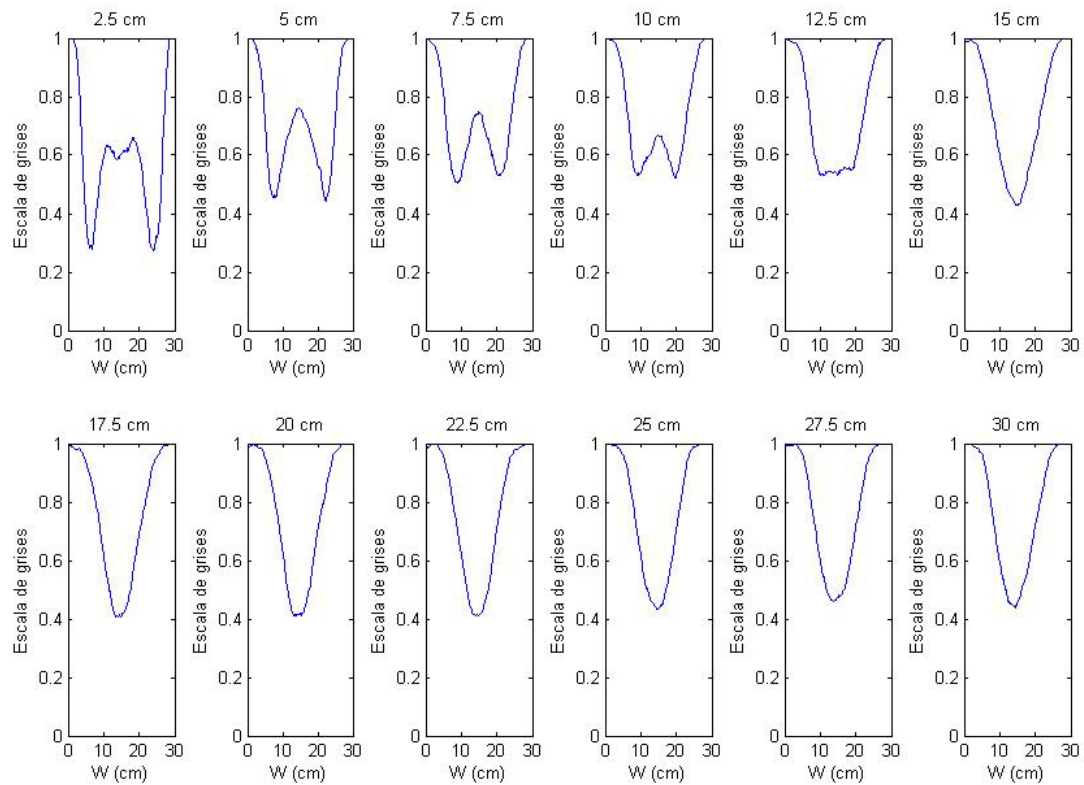


Imagen 24: Configuración 3. $L/W=1.33$. $U/U_{mf}=2.5$.

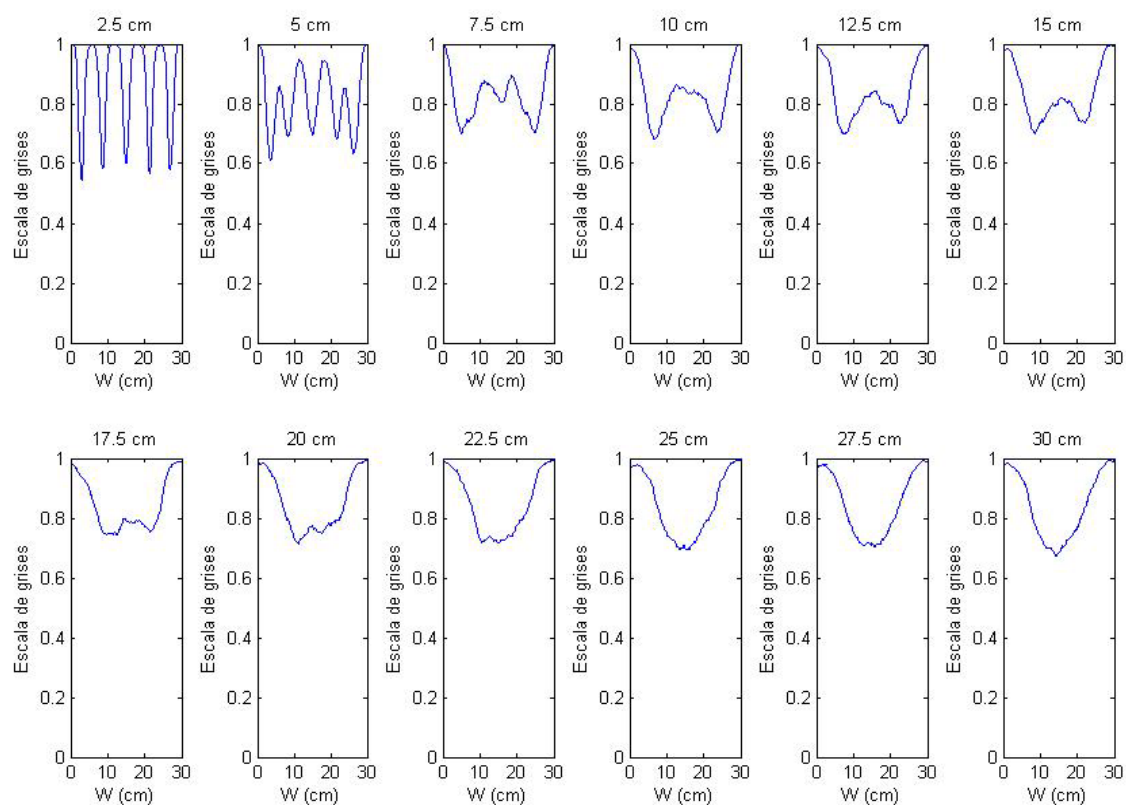


Imagen 25: Configuración 3. $L/W=1,667$. $U/U_{mf}=1,5$.

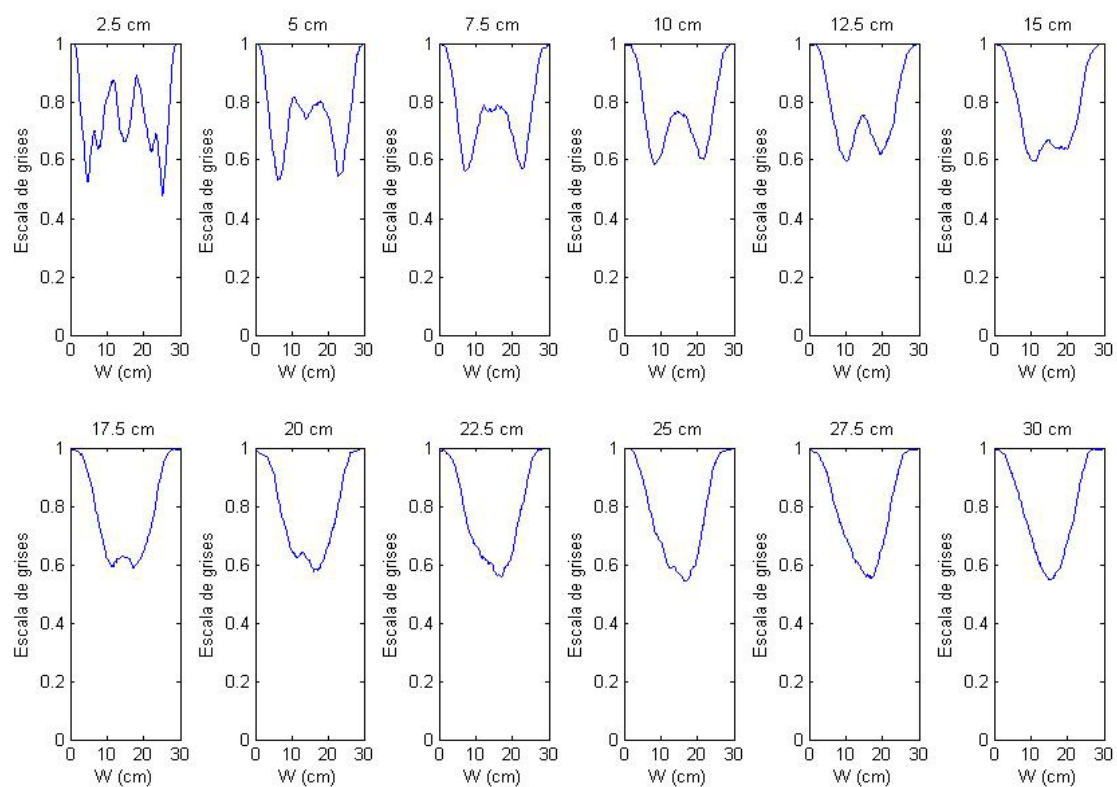


Imagen 26: Configuración 3. $L/W=1,667$. $U/U_{mf}=2$.

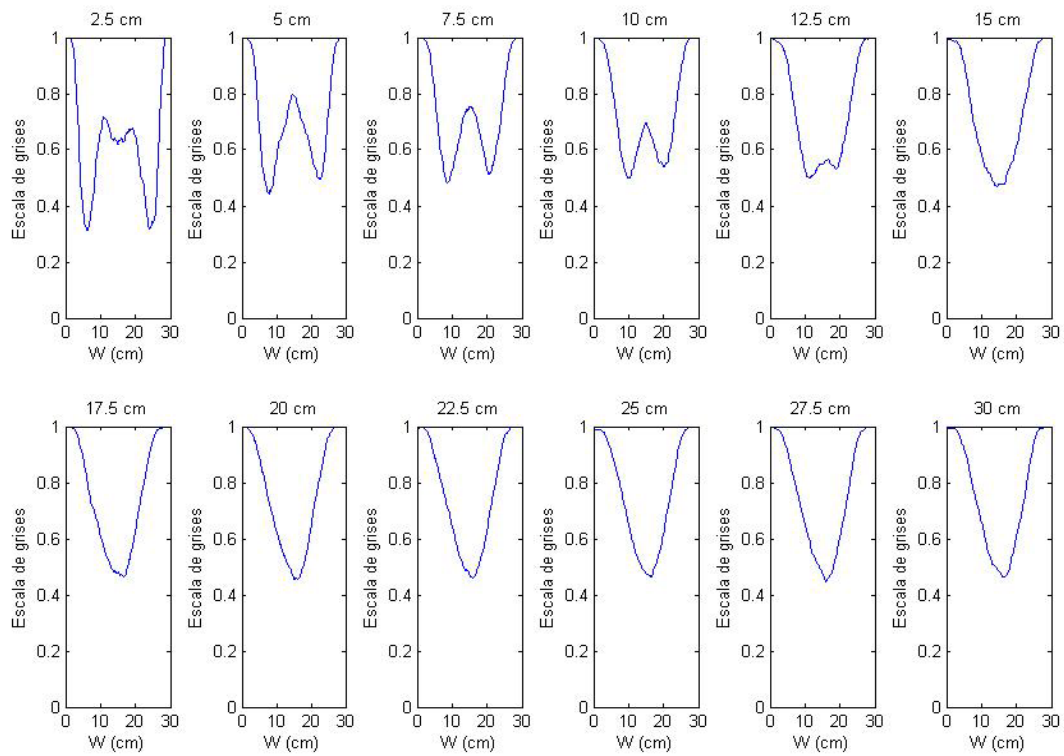


Imagen 27: Configuración 3. $L/W=1,667$. $U/U_{mf}=2,5$.

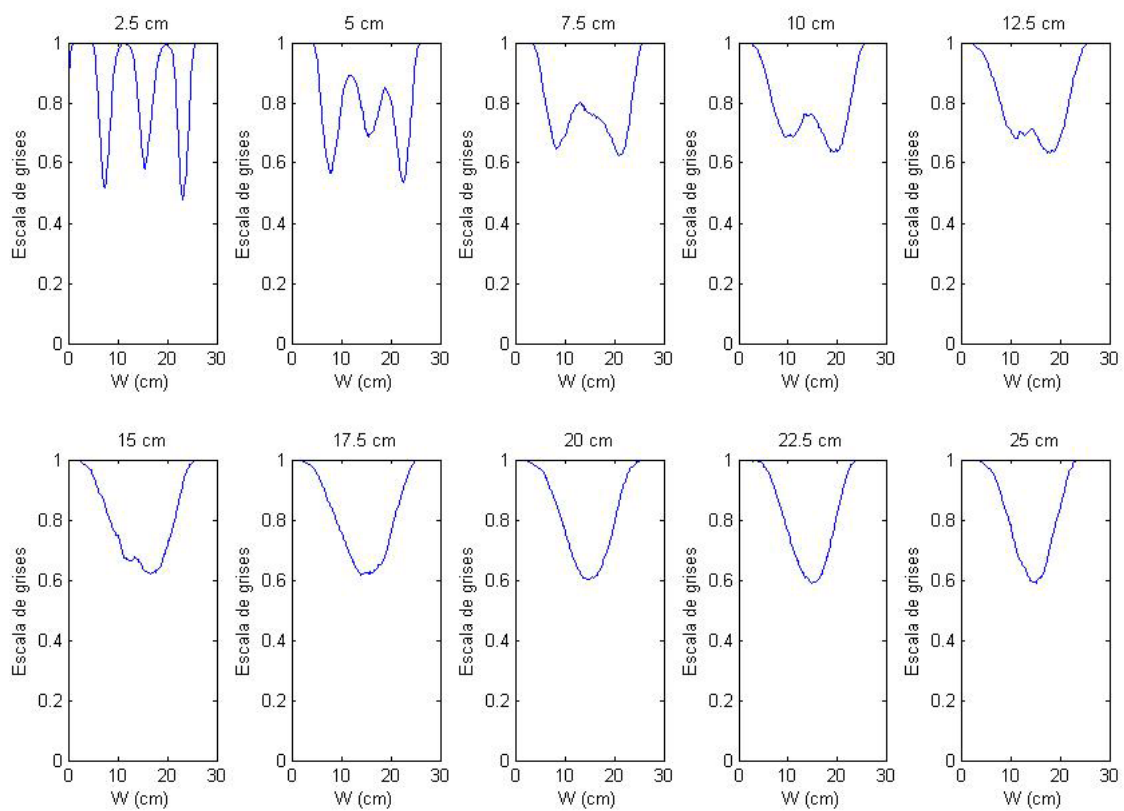


Imagen 28: Configuración 4. $L/W=1$. $U/U_{mf}=1,5$.

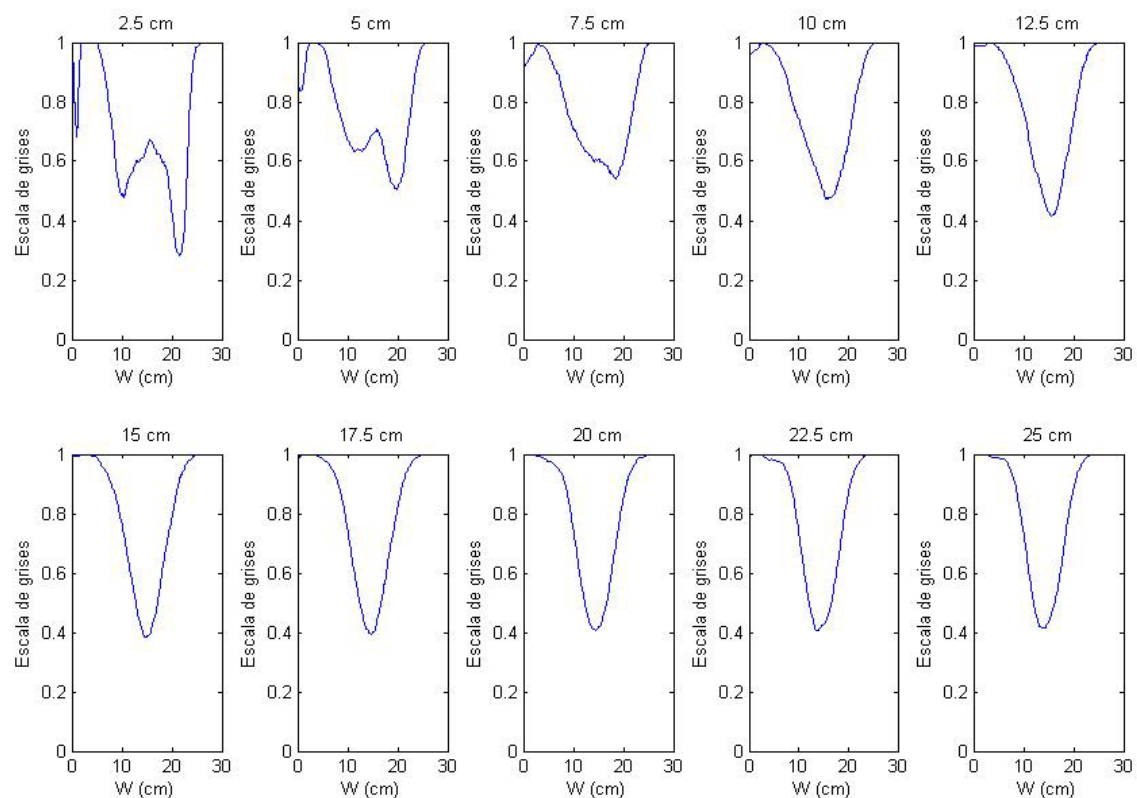


Imagen 29: Configuración 4. $L/W=1$. $U/U_{mf}=2$.

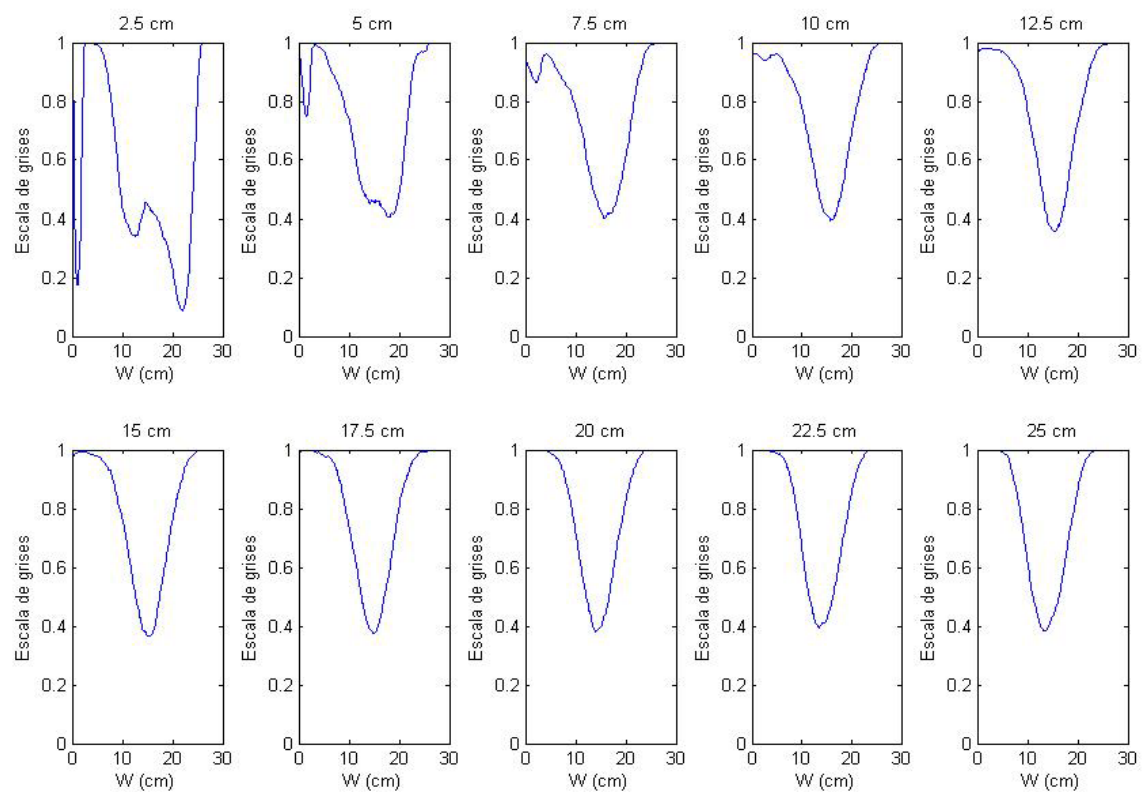


Imagen 30: Configuración 4. $L/W=1$. $U/U_{mf}=2,5$.

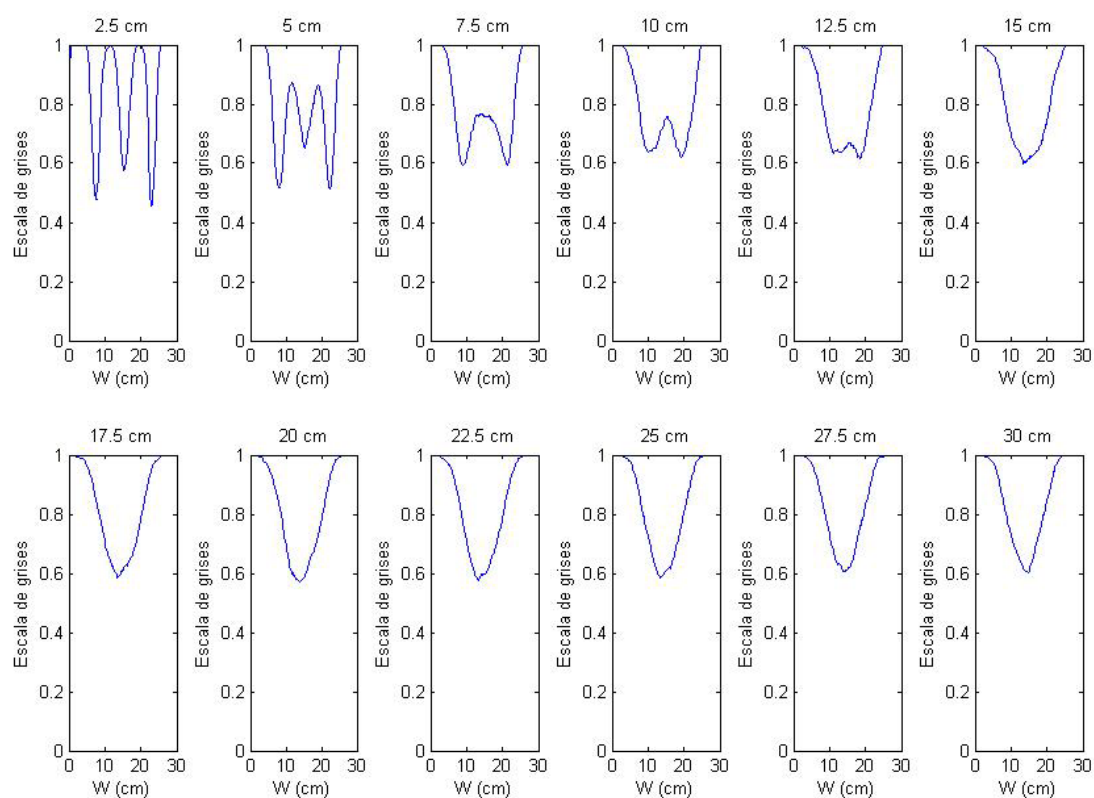


Imagen 31: Configuración 4. $L/W=1,33$. $U/U_{mf}=1,5$.

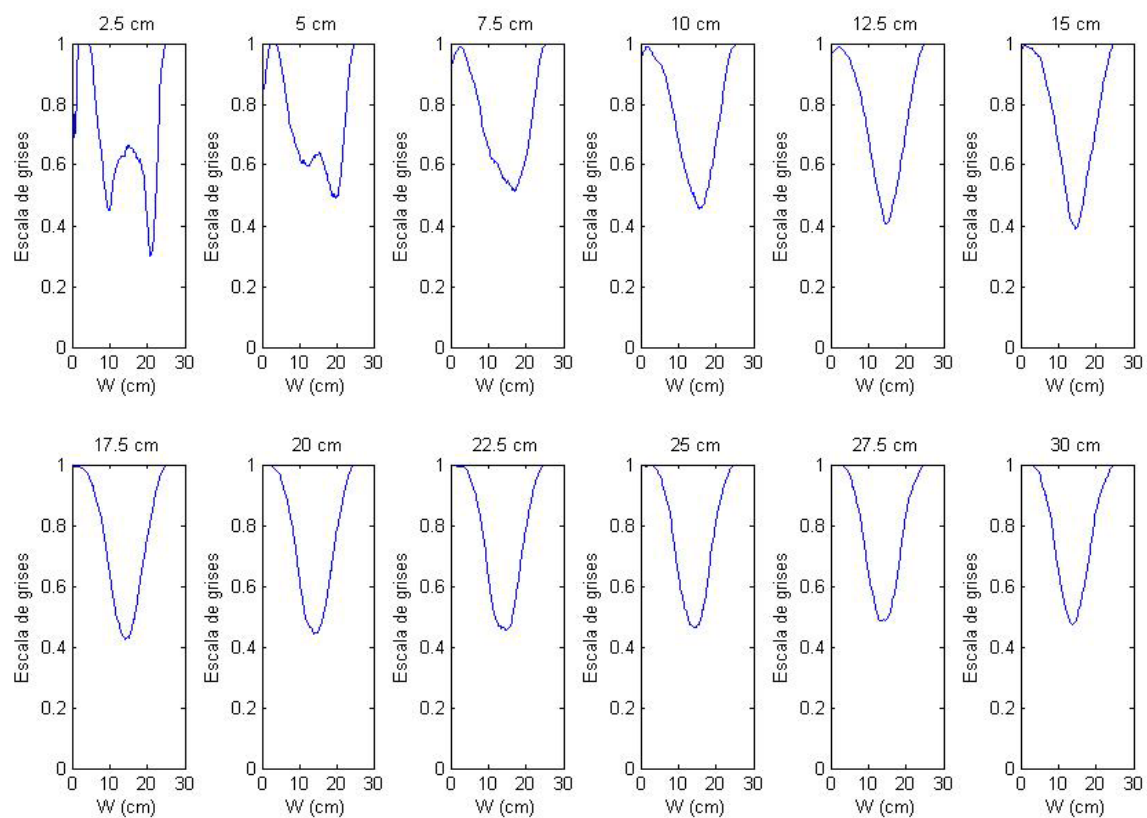


Imagen 32: Configuración 4. $L/W=1,33$. $U/U_{mf}=2$.

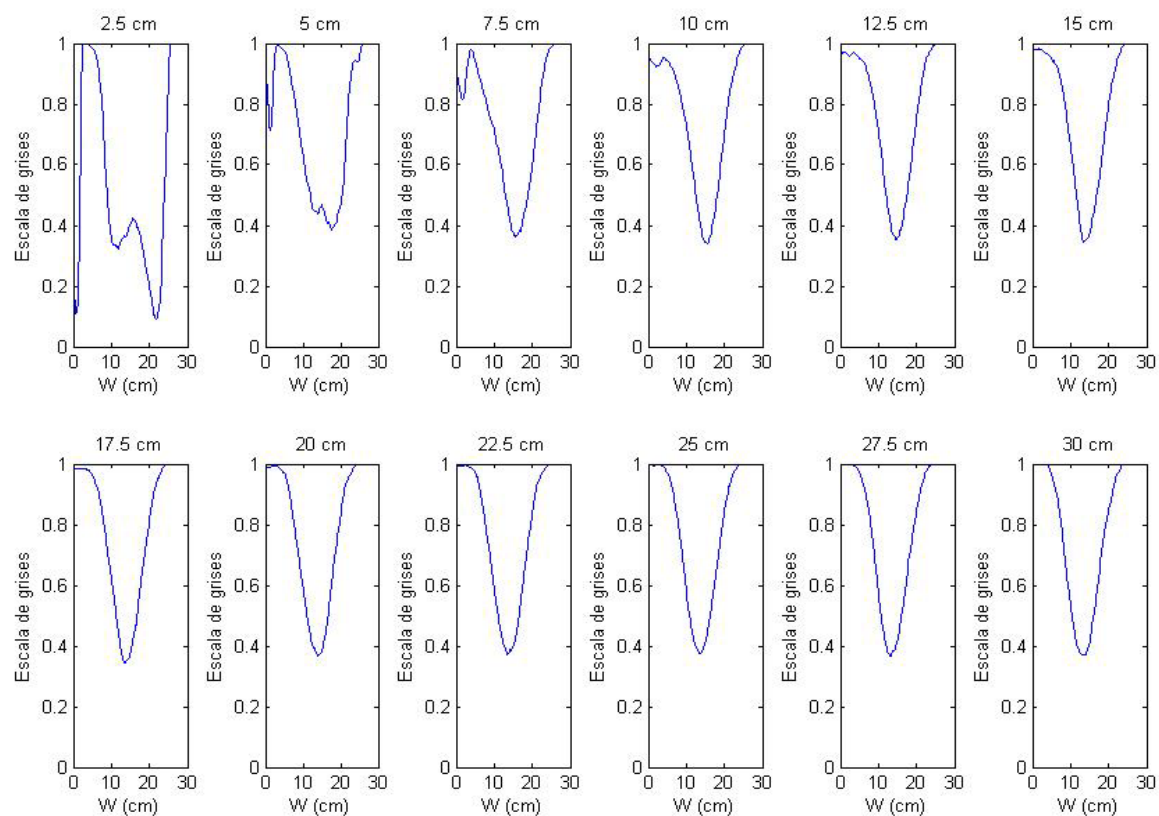


Imagen 33: Configuración 4. $L/W=1,33$. $U/U_{mf}=2,5$.

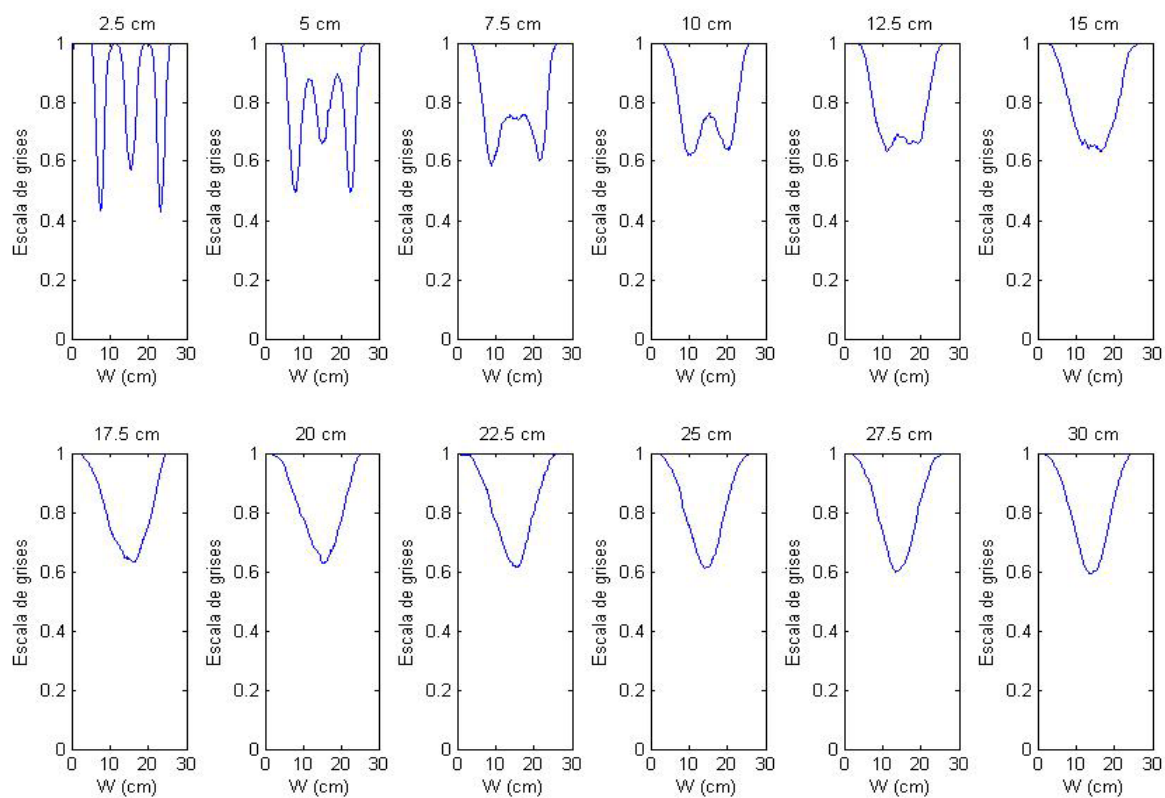


Imagen 34: Configuración 4. $L/W=1,667$. $U/U_{mf}=1,5$.

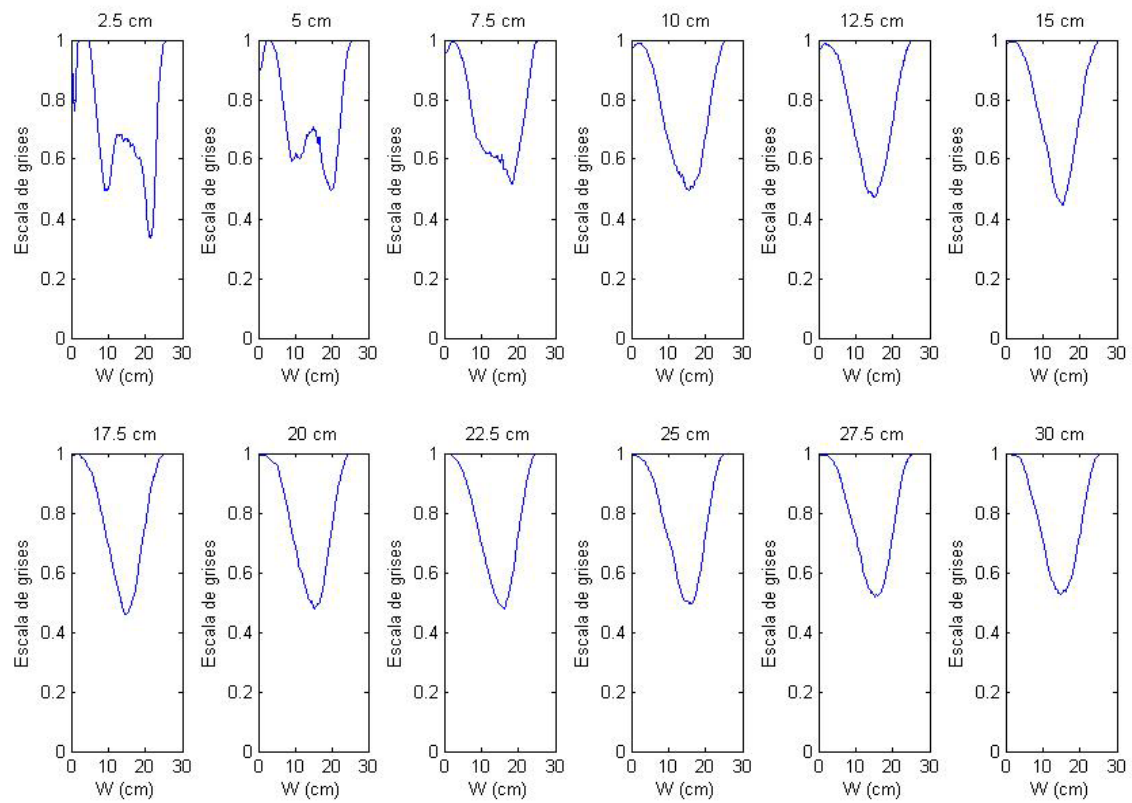


Imagen 35: Configuración 4. $L/W=1,667$. $U/U_{mf}=2$.

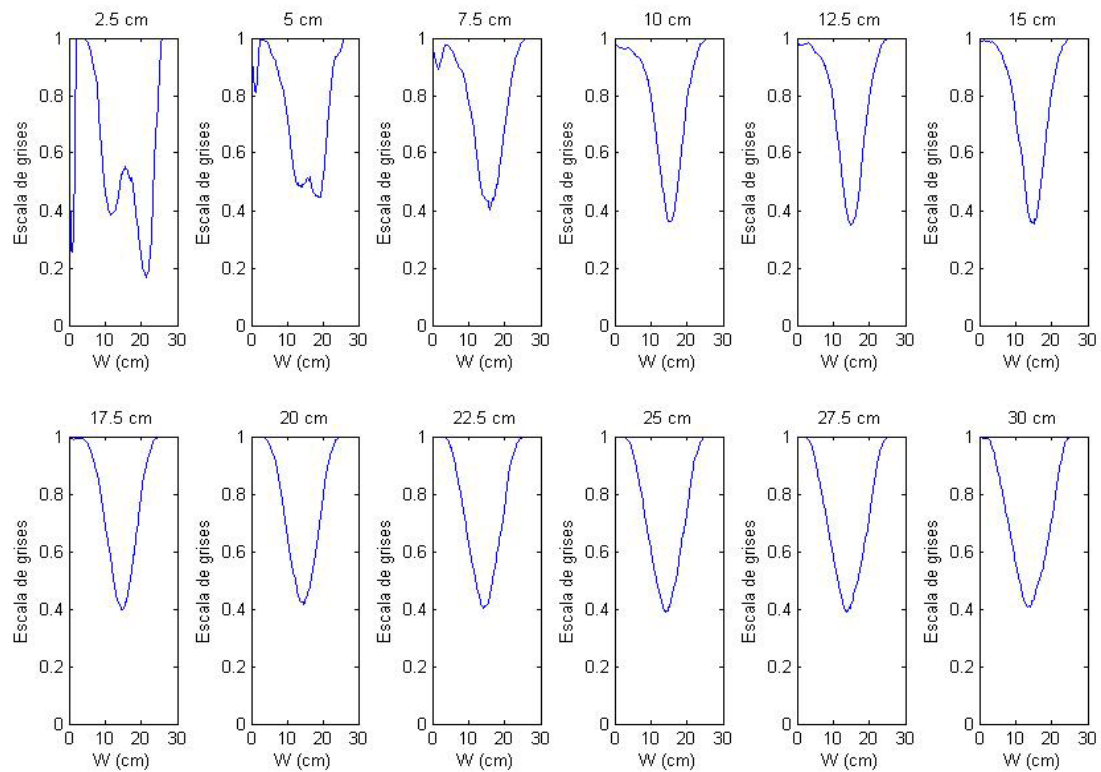


Imagen 36: Configuración 4. $L/W=1,667$. $U/U_{mf}=2,5$.